INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Junio 2022 · nº 549 · 6,50 €
Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

NAVEGACIÓN CUÁNTICA

Biofísica de la brújula interna de las aves

EVOLUCIÓN
La inteligencia de los neandertales

CORONAVIRUS
Por qué es tan evasiva la variante ómicron

INFORME ESPECIAL
Restauración ecológica de los ríos

ARTÍCULOS

17 QUÍMICA BIOFÍSICA
El vals cuántico de las aves migratorias

25 VIROLOGÍA
La naturaleza evasiva de ómicron

31 ARQUEOLOGÍA
La nueva arqueología de Jerusalén

47 INFORME ESPECIAL
La fragmentación de los ríos
La restauración de los arroyos urbanos

68 EVOLUCIÓN
Neandertales como nosotros

SECCIONES

03 APUNTES
Misivas para alienígenas
Batracios voladores
La placenta inspira estrategias contra el cáncer
Microbios marinos que cazan mediante moco
Cartografiar la desnutrición desde el espacio
Hojas ingeniosas
Fármacos en el agua
Supergeles
Un nuevo actor en el origen de las espinillas
Colonialismo en la paleontología

16 LA IMAGEN DEL MES
El piojo de la abeja

40 HISTORIA DE LA CIENCIA
Retratos de la naturaleza peregrina

45 FORO CIENTÍFICO
Los océanos se asfixian

75 CURIOSIDADES DE LA FÍSICA
El efecto fotoacústico, o cómo escuchar la luz

79 JUEGOS MATEMÁTICOS
¿Cómo se distribuye el talento?

84 LIBROS
Diario de un medallista Fields

IMAGEN DE PORTADA: KYLE BEAN

APUNTES

Los científicos proponen enviar un mensaje al espacio usando la Batería de Telescopios Allen de California (*mostrada en la imagen*) o el telescopio FAST de China.

SETH SHOSTAK/INSTITUTO SETI

MISIVAS PARA ALIENÍGENAS

Presentan una nueva propuesta para enviar mensajes al espacio

Si alguna vez descubrimos vida inteligente fuera de la Tierra, una pregunta clave será: «¿Cómo nos comunicamos?». Un equipo internacional de investigadores liderado por Jonathan H. Jiang, del Laboratorio de Propulsión a Chorro de la NASA, ha presentado una nueva misiva destinada a receptores extraterrestres. El «Faro de la Galaxia», que consta de 13 partes, actualiza el mensaje de Arecibo de 1974, el primer intento de la humanidad de enviar una comunicación comprensible para una inteligencia extraterrestre.

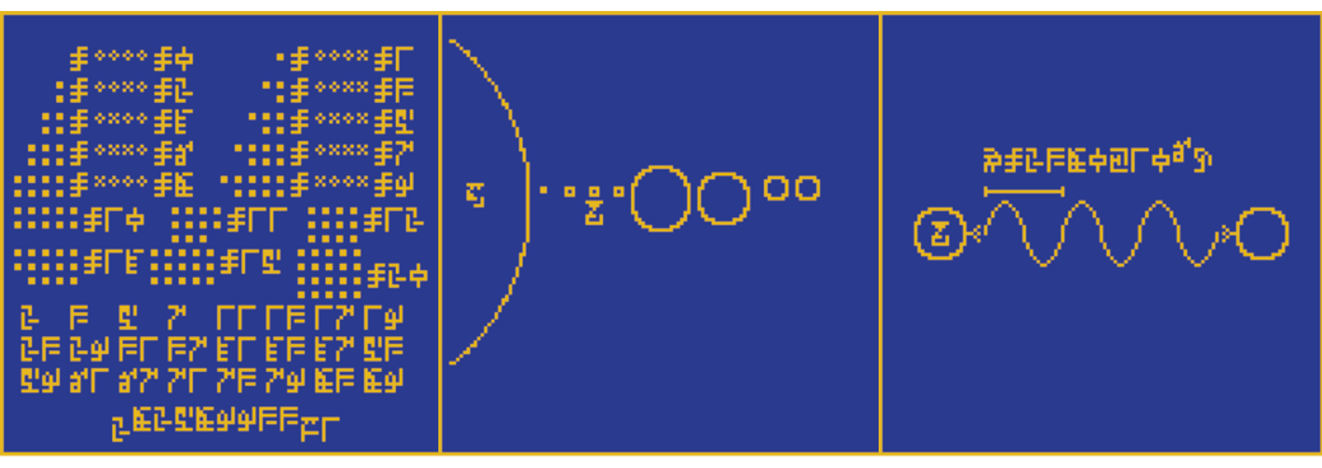
Jiang y sus colaboradores proponen dirigir el mensaje a un denso anillo de estrellas cercanas al centro de la Vía Láctea y que podrían albergar planetas prometedores. La transmisión incluye un remite concebido para ayudar a cualquier oyente extraterrestre a determinar nuestra posición, con la esperanza de que eso nos permita entablar una conversación interestelar. «El diseño pretende aportar la máxima cantidad de información sobre nuestra sociedad y la especie humana en un mensaje de extensión mínima», explica Jiang. «Gracias a los avances en tecnología digital, podemos hacerlo mucho mejor que en 1974.»

Casi todos los mensajes que hemos enviado al espacio hasta ahora comienzan con un intento de establecer puntos en común por medio de las matemáticas y la ciencia básica, que presumiblemente le resultarán familiares a cualquier especie extraterrestre lo bastante avanzada como para recibir una señal de radio. Pero los científicos deben decidir cómo codificar esos conceptos. En vez de emplear sistemas numéricos o lenguajes humanos arbitrarios, muchos proyectos (incluido el «Faro de la Galaxia») optan por presentar el mensaje como un mapa de bits, una imagen pixelada creada a partir de código binario.

Usar un mapa de bits es un enfoque lógico, ya que parece que cualquier especie inteligente podría reconocer la naturaleza de un sistema binario, que adopta dos estados: encendido o apagado, presente o ausente. No obstante, la estrategia también presenta inconvenientes. Cuando Frank Drake, pionero en la búsqueda de inteligencia extraterrestre, creó un prototipo de la transmisión de Arecibo, envió el mensaje binario a algunos colegas, entre ellos varios premios Nobel. Ninguno entendió su contenido y solo uno se percató de que se trataba de un mapa de bits.

E incluso si los alienígenas lograran descifrar el mensaje, quizá no fueran capaces de ver ninguna imagen. «Una de las ideas clave es que los extraterrestres también poseerán sentido de la vista, dado que este ha surgido de manera independiente muchas veces en la Tierra», indica Douglas Vakoch, presidente del proyecto METI (Envío de Mensajes a Inteligencia Extraterrestre), una organización sin ánimo de lucro que estudia cómo comunicarse con otras formas de vida. «Pero ese es un gran condicionante, e incluso si pudieran ver, la cultura es una parte integral de la forma en que representamos los objetos.»

El enfoque de Jiang y sus colegas, publicado en la revista *Galaxies*, se basa en gran medida en el mensaje «Cosmic Call», enviado en 2003 desde el radiotelescopio Eupatoria RT-70, situado en la región de Crimea. Esa transmisión incluía un «alfabeto» de mapa de bits especialmente diseñado para ser robusto frente a errores de transmisión. El mensaje de Jiang, que comienza enviando un número primo para subrayar el carácter artificial de la emisión, emplea ese alfabeto para presentar nuestro sistema numérico decimal y las matemáticas básicas. A continuación, se vale de un fenómeno universal —la radiación que libera un átomo de hidrógeno al cambiar de estado energético— para explicar la noción de tiempo e indicar el momento en que se envió la comunicación desde la Tierra. La misiva también muestra los elementos más comunes de la tabla periódica y describe la estructura y química del ADN.



Páginas del mensaje «Faro de la Galaxia» donde se codifican los números, se representa el sistema solar y se invita al receptor a responder en una frecuencia específica. Los autores proponen transmitir las 13 partes de la misiva mediante código binario que el receptor transformaría en imágenes.

FUENTE: «A BEACON IN THE GALAXY: UPDATED ARECIBO MESSAGE FOR POTENTIAL FAST AND SETI PROJECTS», POR JONATHAN H. JIANG ET AL. EN *GALAXIES*, VOL. 2, ART. 55, MARZO DE 2022

Las últimas páginas podrían ser las más interesantes para los extraterrestres, pero también las más difíciles de entender. Incluyen un boceto de un hombre y una mujer, un mapa de la superficie terrestre, un diagrama del sistema solar y la frecuencia de radio que los alienígenas deberían usar para responder al mensaje. Además, proporcionan las coordenadas de nuestro sistema solar con respecto a los cúmulos globulares, grupos estables y compactos de miles o millones de estrellas que seguramente conocería cualquier especie que observara el espacio desde algún lugar de la galaxia.

Los investigadores proponen transmitir el mensaje desde la Batería de Telescopios Allen de California o desde el Telescopio Esférico de Quinientos Metros de Apertura (FAST, por sus siglas en inglés) de China. Tras la reciente destrucción del telescopio de Arecibo, estos son los únicos radiotelescopios del mundo vinculados de forma activa a la búsqueda de inteligencia extraterrestre. Por ahora, sin embargo, lo único que pueden hacer ambos instrumentos es escuchar el cosmos, y Jiang admite que dotarlos de equipos de transmisión sería un proyecto complejo. Pero es factible, y el grupo de Jiang ya ha empezado a hablar con los investigadores del telescopio FAST para materializarlo.

Una cuestión más profunda y que ha generado controversia entre muchos científicos de este campo es si deberíamos enviar un mensaje: ¿podría ser una pérdida de tiempo o alentar el ataque de seres malignos? «Yo no vivo con miedo a una horda invasora, pero otras personas sí. Y que yo no comparta sus temores no significa que sean irrelevantes», afirma Sheri Wells-Jensen, investigadora de la Universidad Estatal de Bowling Green experta en temas lingüísticos y culturales relacionados con el diseño de mensajes interestelares. Pero «el hecho de que sea difícil alcanzar un consenso global sobre qué mensaje enviar, o si conviene enviarlo, no implica que debamos renunciar a ello. Es nuestra responsabilidad intentarlo e informar a tanta gente como sea posible».

Muchos insisten en que los posibles beneficios de la búsqueda activa de inteligencia extraterrestre superan claramente a los riesgos. Argumentan que el primer contacto constituiría uno de los mayores hitos de la historia de nuestra especie, y si nos limitamos a esperar que alguien nos llame, quizá no ocurra nunca. En cuanto al peligro de que nos aniquile una especie alienígena malvada, hace tiempo que hemos delatado nuestra presencia. Lo más probable es que cualquier extraterrestre capaz de viajar hasta la Tierra no tuviese problemas para detectar indicios de vida en las firmas químicas de nuestra atmósfera o en la radiación electromagnética que emiten nuestras radios, televisores y sistemas de radar desde hace un siglo.

«Invitamos a todo el mundo a participar en el debate sobre el envío de este mensaje», concluye Jiang. «Confiamos en que la publicación de nuestro artículo anime a la gente a pensar en ello.»

Daniel Oberhaus

BATRACIOS VOLADORES

Los análisis y las pruebas de vuelo demuestran cómo planean las ranas «paracaidistas»

Algunas ranas de las selvas de Asia oriental llevan el salto hasta el extremo. Apodadas paracaidistas, saltan desde lo alto de los árboles y planean entre las copas para escapar de los enemigos, llegando a recorrer una veintena de metros en un solo salto.

Carentes de alas como las de las aves o los murciélagos, recurren a las membranas interdigitales como superficie de planeo para frenar el descenso. Poseen, además, pies desmesurados para su talla, faldones cutáneos a lo largo de las extremidades y almohadillas en los dedos que amortiguan el aterrizaje.

David Hillis, biólogo evolutivo de la Universidad de Texas, y sus colaboradores del Instituto de Biología de Chengdu, en China, recolectaron varios ejemplares de *Rhacophorus reinwardtii*, una rana paracaidista de color verde lima dotada de membranas negras y amarillas, oriunda de la pluvisilva del sur de China, para desentrañar la base genética de esas adaptaciones tan singulares.

El equipo compiló el genoma de esta rana arborícola y lo comparó con el de otros anuros cercanos incapaces de planear. En un estudio publicado en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, señaló la localización de 455 genes modificados. «Muchos de los genes que hallamos están vinculados con diversos aspectos del desarrollo de las extremidades, los pies y los dedos palmeados. Todos coinciden con la gran adaptación morfológica de las ranas voladoras al planeo», explica Hillis. Los investigadores comprobaron que algunos alargaban las extremidades y mejoraban la adherencia de las ventosas digitales durante la trepa. Mediante el estudio del desarrollo de las extremidades en los renacuajos de cada especie, también descubrieron la red de genes que probablemente sea la responsable del crecimiento extraordinario.

Con el fin de observar esas diferencias en acción, efectuaron una serie de pruebas de vuelo en condiciones controladas. Situaron a individuos de cada especie en posaderos y registraron los saltos y los planeos. Antes colocaron espon-


ARUN ROISRI/GETTY IMAGES

Rana paracaidista.

jas blandas por debajo por si algo iba mal en el aire. Esto resultó providencial para las ranas no planeadoras, que cayeron a plomo encima de ellas. Las ranas paracaidistas, en cambio, extendieron los dedos y planearon suavemente hasta tomar tierra.

Según la experta en biomecánica de la Universidad de California en Berkeley Mimi Koehl, que ha estudiado la biodinámica de las ranas planeadoras pero es ajena al trabajo, las amplias membranas interdigitales frenan la caída y al mismo tiempo ayudan a controlar el vuelo a través de las copas de los árboles. Las ranas esquivan los árboles moviendo las patas posteriores como timones mientras descienden hacia las charcas, donde se congregan antes del apareamiento y la puesta. «Si no pudiesen maniobrar a través de la espesura no llegarían puntuales a la cita», explica Koehl.

Los autores afirman que conocer a fondo las adaptaciones de estos anuros tal vez ofrezca pistas sobre el modo en que otros animales, desde las ardillas hasta los lagartos voladores, se lanzaron a la conquista del aire.

Koehl y sus colaboradores han estado empleando las ranas planeadoras como modelos del vuelo de los dinosaurios. Los dinosaurios voladores poseían «colas emplumadas y plumas en las extremidades posteriores. Es decir, el mismo diseño anatómico que las ranas», apunta la experta.

Stephanie Pappas

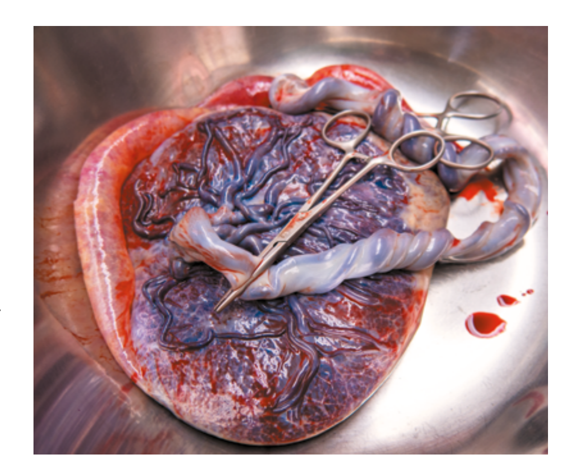
MEDICINA

LA PLACENTA INSPIRA ESTRATEGIAS CONTRA EL CÁNCER

El análisis genético de este órgano ofrece ideas para fármacos antineoplásicos

Con el objetivo de obtener nutrientes para el feto, la placenta se implanta en el útero, una «invasión» que semeja el modo en que el tumor se infiltra en el tejido sano. Ahora se han descubierto genes que ayudan a regular la implantación placentaria y que podrían ser instructivos de cara al desarrollo de medicamentos contra el cáncer, según un nuevo estudio publicado en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*.

Se sabía que la profundidad de penetración de la placenta difiere entre las especies. En el ser humano y en los simios superiores, las células placentarias se internan en la pared uterina con relativa facilidad (placenta hemocorial), pero en otros animales, como las vacas y los caballos, el útero ha evolucionado para resistir más tenazmente a esa invasión (placenta epiteliocorial). Esta característica ayudaría a proteger el sistema inmunitario de la madre y reduciría los daños que sufre el útero en el alumbramiento.



GETTY IMAGES

Placenta después del parto.

En 2019, los biólogos celulares Günter Wagner, de la Universidad Yale, y Kshitiz, de la Universidad de Connecticut, descubrieron que esa resistencia celular va más allá del útero. Comprobaron que existía una interrelación directa entre la profundidad de la implantación de la

placenta y la velocidad con que los tumores se extienden más allá del foco inicial en el cuerpo de cada especie. Las especies con placentas más invasivas presentaban mayores tasas de cáncer metástasico; el material celular que conecta los tejidos y los órganos de esas especies es menos resistente a la invasión, tanto de la placenta como de los tumores. La cuestión es por qué.

En el nuevo estudio, Kshitiz, Wagner y sus colaboradores examinaron en nueve especies de mamíferos las diferencias en la producción de proteínas que explicasen por qué los tejidos de algunas resisten mejor la infiltración. El equipo descubrió dos proteínas que, cuando se producen en abundancia, hacen más vulnerable el tejido a las células invasoras, sean placentarias o tumorales. Cuando eliminaron los genes productores de las proteínas, las células bloquearon la invasión con más eficacia.

«Una mutación que ayuda al útero a mantener a raya la placenta también podría influir en la biología del cáncer, por ejemplo, en la piel», explica Wagner.

A juicio de Sam Behjati, biólogo del cáncer en el Instituto Wellcome Sanger, ajeno al estudio, este descubrimiento apunta a nuevos modos de detener el crecimiento y la diseminación de los tumores. «Se trata de un estudio comparativo esencial», opina. Conocemos a fondo las etapas moleculares que exige la implantación y «sería bueno emplear esa línea de pensamiento farmacológico en las metástasis».

Con todo, Amy Boddy, oncóloga comparativa de la Universidad de California en Santa Barbara, que tampoco ha participado en el estudio, advierte de que ese proceso específico de invasión probablemente no cuente toda la historia. Las causas y los factores precipitantes de los tumores son diversos. «Todo ser vivo pluricelular es susceptible de padecer cáncer. Apenas hemos comenzado a indagar en los mecanismos», lamenta Boddy.

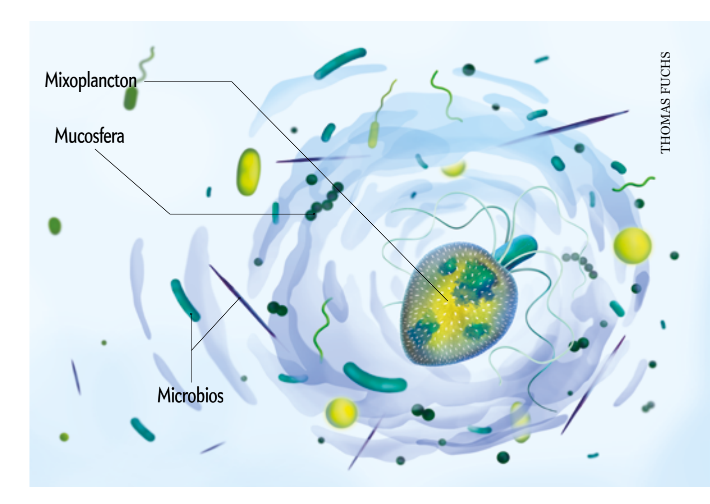
Carrie Arnold

MICROBIOLOGÍA

MICROBIOS MARINOS QUE CAZAN MEDIANTE MOCO

Las «mucosferas» de estos organismos desempeñan un papel muy importante en el ciclo del carbono del planeta

Unos peculiares microbios marinos llamados mixoplancton son capaces de obtener energía a través de la fotosíntesis o devorando a otros microbios. Ahora una nueva investigación publicada en *Nature Communications* indica que una de esas especies, *Prorocentrum cf. balticum*, hace gala de una táctica de caza tan astuta como extraña que estaría contribuyendo de forma sustancial al ciclo del carbono que vincula la tierra, la atmósfera y los mares.



La autora principal del estudio, Michaela Larsson, bióloga marina en la Universidad Politécnica de Sídney, y sus colaboradores es-

taban estudiando el mixoplancton marino en el laboratorio cuando se percataron de que los microorganismos giraban y se retorcían mientras segregaban moco. Aparte de realizar la fotosíntesis durante el día, por la noche también crean una «mucosfera» rica en carbono en torno a sí mismos y, a continuación, emiten señales químicas con las que atraen hacia ella a otros microbios. El mixoplancton devora a los incautos y se deshace del moco, que se hunde hasta el fondo marino, donde forma un depósito rico en carbono.

Según Larsson, el estudio «demuestra que hay que revisar nuestra visión del ciclo de carbono en el océano para incorporar los comportamientos refinados de los microbios». La identificación del ADN de *P. balticum* en un conjunto de datos mundiales de microbios marinos demuestra que está presente en todos los mares, por lo que es probable que su contribución al ciclo planetario del carbono sea notable. Los autores calculan que este tipo de plancton podría estar secuestrando hasta 0,15 gigatoneladas de carbono cada año, alrededor del 0,5 por ciento de las emisiones anuales de carbono.

Aditee Mitra, modelizador de sistemas marinos en la Universidad de Cardiff, que no ha participado en la investigación, opina que el artículo «es una prueba más de lo poco que sabemos acerca de los organismos marinos que, en conjunto, han generado casi la mitad del oxígeno atmosférico y siguen desempeñando un papel esencial en los ciclos biogeoquímicos terrestres».

Desde que el artículo se publicara se ha comprobado que otras especies de mixoplancton forman y liberan mucosferas. También se investiga cómo podría variar su comportamiento en diferentes condiciones marinas. «El descubrimiento de este comportamiento microbiano y el análisis de la gran repercusión que tiene en los ciclos biogeoquímicos marinos no ha hecho sino comenzar», asegura Larsson.

Susan Cosier

TECNOLOGÍA

CARTOGRAFIAR LA DESNUTRICIÓN DESDE EL ESPACIO

Un algoritmo de inteligencia artificial puede detectar carencias alimenticias a partir de datos satelitales

THOMAS FUCHS

La falta de micronutrientes afecta a más de 2000 millones de personas en todo el mundo, incluidos 340 millones de niños. Esa carencia de vitaminas y minerales puede acarrear graves consecuencias para la salud, pero diagnosticarla con suficiente antelación para combatirla de forma eficaz requiere extracciones de sangre y pruebas de laboratorio lentas y costosas.

Un nuevo estudio ofrece una alternativa más eficiente. La científica computacional Elizabeth Bondi y sus colaboradores de la Universidad Harvard emplearon datos satelitales de dominio público y un algoritmo de inteligencia artificial para localizar áreas geográficas cuya población corre un alto riesgo de sufrir déficit de micronutrientes. Este análisis podría allanar el camino para la aplicación temprana de medidas de salud pública.

Los sistemas de inteligencia artificial actuales pueden emplear datos de satélite para predecir problemas locales de seguridad alimentaria, pero suelen basarse en aspectos directamente observables. Por ejemplo, es posible estimar la productividad agrícola a partir de vistas de la vegetación. Sin embargo, calcular la disponibilidad de micronutrientes resulta más complicado.

Inspirándose en un estudio que mostraba que la población de las zonas cercanas a los bosques suele presentar una dieta más diversa, Bondi y sus colaboradores identificaron indicadores poco conocidos de una posible desnutrición. Su trabajo demuestra que combinar datos como la cubierta vegetal, las condiciones meteorológicas y la presencia de agua puede dar pistas sobre los lugares donde la gente padecerá carencias de hierro, vitamina B12 o vitamina A.

El equipo examinó las mediciones en bruto de los satélites y consultó a funcionarios sanitarios locales. Luego usó un programa de inteligencia artificial para escudriñar los datos y determinar las características clave. Por ejemplo, la existencia de un mercado de alimentos, inferida de las carreteras y los edificios visibles, resultaba esencial para prever el riesgo de una comunidad. Por último, los investigadores relacionaron esas características con las carencias de nutrientes concretos en la población de cuatro regiones de Madagascar, empleando datos reales de biomarcadores (muestras de sangre analizadas en laboratorios) para entrenar y probar su algoritmo.

Las predicciones sobre la carencia de micronutrientes a escala regional, para poblaciones que no estaban incluidas en los datos de entrenamiento, alcanzaron (y a veces superaron) la precisión de los cálculos basados en los sondeos de las autoridades sanitarias locales. «Nuestro trabajo describe un método que permite identificar poblaciones vulnerables, para brindarles un soporte nutricional que complemente [otros] procedimientos costosos e invasivos», subraya Bondi. El estudio se presentó en el congreso virtual que celebró en febrero la Asociación para el Avance de la Inteligencia Artificial.

«Es una contribución novedosa que resalta el potencial de la inteligencia artificial para promover la sanidad pública», valora Christine Ekenga, epidemióloga de la Universidad Emory ajena al estudio. La obtención de datos sanitarios en áreas de bajos recursos puede verse dificultada por limitaciones económicas y de infraestructuras, añade, pero «los autores han validado un método capaz de vencer estos obstáculos».

Los autores pretenden desarrollar una aplicación informática para extender su análisis a otros países que dispongan de datos satelitales públicos. «Esperamos que esa aplicación permita a las autoridades sanitarias interactuar con la información que proporciona nuestro sistema y les ayude a diseñar intervenciones», concluye Bondi.

Rachel Berkowitz

ECOLOGÍA

HOJAS INGENIOSAS

Las secuoyas sedientas absorben agua del aire

Cuando uno pasea por los bosques de secuoyas rojas (*Sequoia sempervirens*) de la costa de California, entre los helechos frondosos, los árboles colosales y el olor a tierra mojada, puede dar la impresión de que no necesitan más agua, pero lo cierto es que soportan veranos secos y, para sobrevivir, las secuoyas disponen de tallos especializados con hojas que absorben el vapor de agua de la atmósfera.

Es sabido que numerosas plantas, las secuoyas entre ellas, absorben agua por las hojas, pero «nadie había averiguado con certeza de qué modo», matiza la ecóloga Alana Chin, ahora en la Escuela Politécnica Federal de Zúrich. Y es que exponer las hojas a la humedad ambiental tiene su contrapartida: los estomas (poros de las hojas por donde entra el dióxido de carbono) quedan obstruidos si sobre ellos se deposita una fina capa de agua, lo que impide la fotosíntesis.

Para ver cómo resuelven los árboles ese dilema, Chin y sus colaboradores treparon a secuoyas que crecían en diversos pisos altitudinales y arrancaron algunas ramitas como muestras. De regreso en el laboratorio, crearon niebla con un humidificador y midieron la can-

tidad de agua que absorbían los tallos. También examinaron la superficie foliar y cortes transversales de las hojas, y después modelizaron el movimiento del agua para ver qué rasgos influyen en la absorción.

Publicado en el *American Journal of Botany*, el análisis reveló que la secuoya roja posee dos tipos de ramillas. Una axial, de hojas escamosas, cuyo aspecto recuerda a un brote de espárrago, constituye solo una pequeña parte de la copa, pero absorbe agua a una velocidad cuatro veces mayor que las ramillas ordinarias, de hojas abiertas en dos hileras (dísticas). El equipo calculó que una secuoya adulta absorbe hasta 50 litros de agua por hora cuando queda empapada. Entretanto, las hojas abiertas se encargan de realizar la fotosíntesis con su gran densidad de estomas y un recubrimiento ceroso que repele el agua.



ALANA CHIN/UNIVERSIDAD DE CALIFORNIA EN DAVIS

La secuoya roja regula la absorción del agua del aire mediante distintas disposiciones de sus hojas.

En el estudio se ha comprobado que las secuoyas que crecen en las zonas más áridas del sur poseen más ramillas escamosas y a alturas mayores que las situadas al norte, lo que las ayuda a captar más agua de la niebla y la lluvia fina que cae en verano. Otras especies arbóreas podrían tener tallos especializados similares; Chin afirma que los pinos, por ejemplo, tienen dos tipos que podrían ser análogos a los de las secuoyas. Esa versatilidad puede resultar importante en el marco del cambio climático, destaca Carter Berry, ecólogo de la Universidad de Wake Forest, ajeno al estudio. «En un planeta más árido, la capacidad de captar el vapor de agua del aire adquiere más importancia.»

Ula Chrobak

CONTAMINACIÓN

FÁRMACOS EN EL AGUA

Muchos ríos del mundo presentan altas concentraciones de medicamentos

Los científicos saben desde hace más de 20 años que los medicamentos con los que tratamos el dolor de cabeza, la diabetes y otras muchas dolencias acaban llegando a los ríos, donde pueden dañar los ecosistemas y favorecer la resistencia a los antibióticos.

Sin embargo, casi todas las investigaciones sobre contaminantes farmacéuticos se han realizado en Norteamérica, Europa y China, y solo han examinado unos pocos compuestos. Además, esos estudios emplean métodos de muestreo y análisis muy diversos, por lo que es difícil comparar sus resultados. Estas limitaciones apuntan a que quizá estemos obviando una pieza importante del rompecabezas de la contaminación.

Un artículo publicado en *Proceedings of the National Academy of Sciences* ofrece una visión más amplia. Una red de 127 científicos tomó muestras de 258 ríos en 104 países para medir la concentración de 61 sustancias distintas. Eso generó «una especie de "huella farmacéutica" de casi 500 millones de personas de todos los continentes», explica John L. Wilkinson, químico ambiental de la Universidad de York y primer autor del estudio.

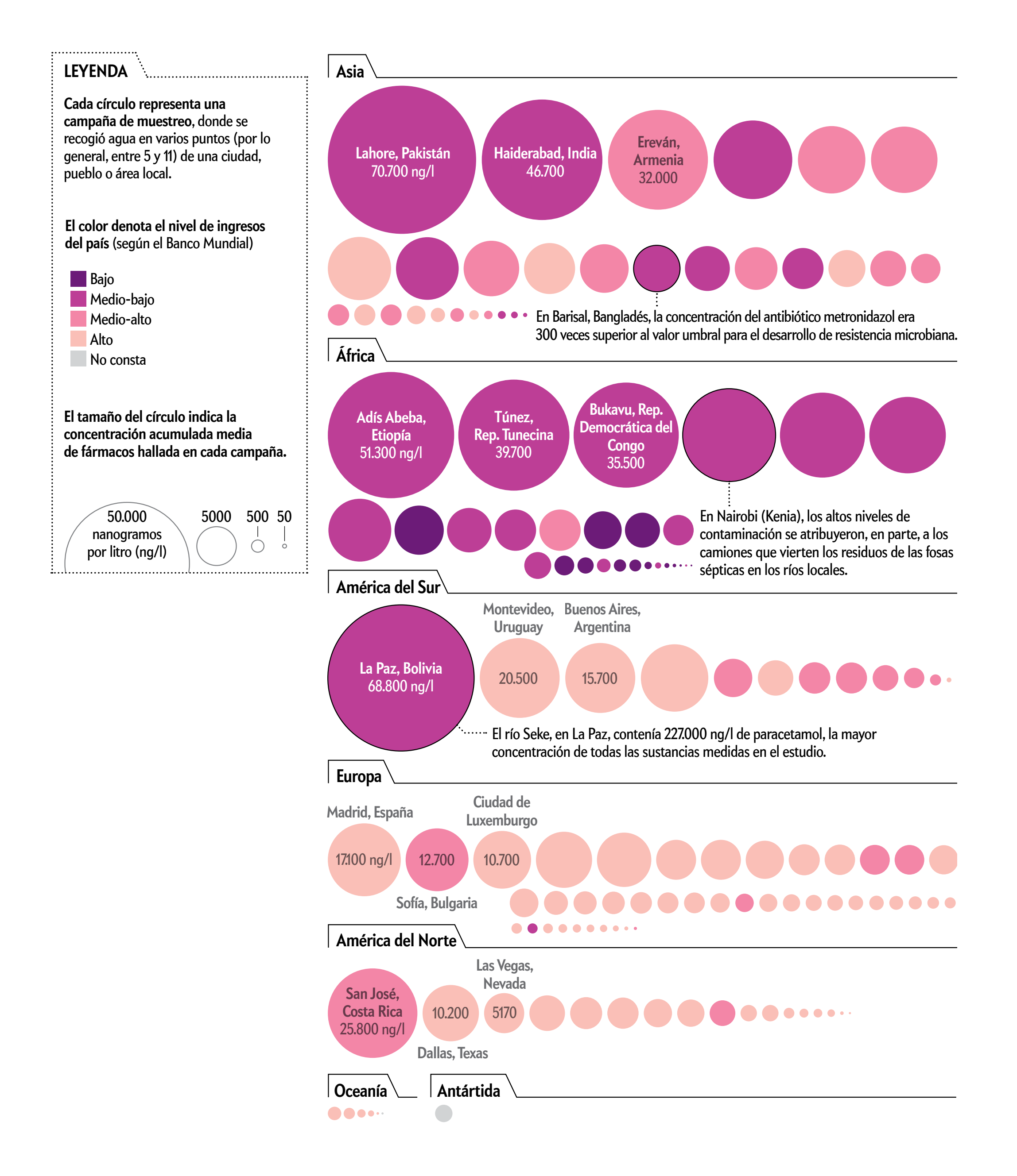
Muchos de los ríos más contaminados por fármacos están en África y Asia, «en regiones y

países olvidados por la comunidad científica» en lo referente a este problema, señala Wilkinson. Además, esos cursos fluviales suelen estar en [países de renta media-baja](); los autores lo achacan a un mejor acceso a los medicamentos en lugares que aún carecen de suficientes infraestructuras para tratar las aguas residuales.

Cuatro compuestos —cafeína, nicotina, paracetamol y cotinina (una sustancia que produce el organismo tras la exposición a la nicotina)— aparecieron en todos los continentes, incluido el antártico. Otros 14, entre ellos antihistamínicos, antidepresivos y un antibiótico, se encontraron en todos los continentes excepto en la Antártida. Algunos fármacos solo se detectaron en lugares concretos, como un antipalúdico hallado en las muestras africanas.

El estudio demuestra que se precisan «más evaluaciones mundiales de la contaminación del agua», en particular para buscar sustancias que supongan un mayor riesgo para la salud, opina Elsie Sunderland, científica ambiental de la Universidad Harvard ajena a la investigación. Otra conclusión, añade, es que «tenemos que [tratar las aguas residuales]()».

Andrea Thompson



MATERIALES

SUPERGELES

Crean «ionogeles» resistentes, elásticos y fáciles de fabricar

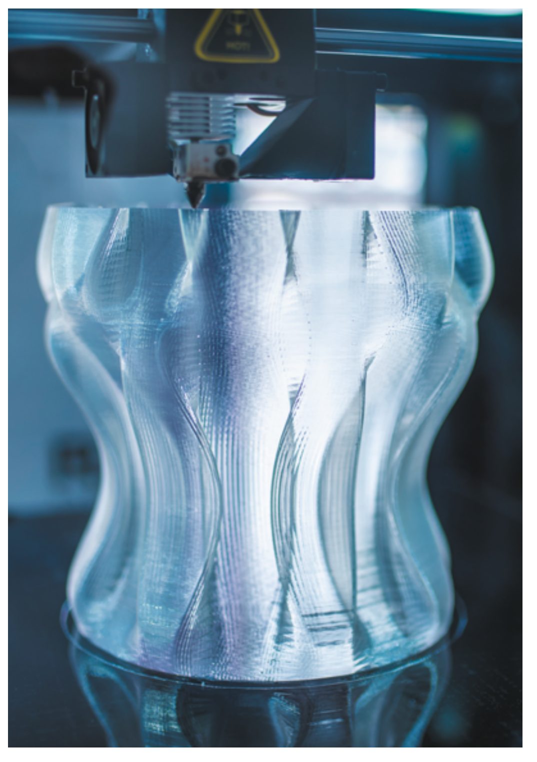
Los hidrogeles son materiales blandos y flexibles que se emplean en una gran variedad de aplicaciones, desde las lentes de contacto hasta la gelatina. Pero todos comparten una estructura común: una enmarañada red de cadenas poliméricas empapadas en agua. Ahora, los investigadores han desarrollado una nueva versión de un ionogel, un material similar a los hidrogeles que es más resistente y podría encontrar incluso más usos, entre ellos, baterías más duraderas.

En lugar de agua, los polímeros de un ionogel contienen un líquido iónico. Ese fluido está formado por iones con carga positiva y negativa, igual que la sal de mesa, solo que los líquidos iónicos no forman sólidos cristalinos a temperatura ambiente. Aun así, los fuertes enlaces entre los iones aseguran que el líquido no se evapora como el agua. Y gracias, en parte, al poder adhesivo de los iones, los polímeros empapados en un líquido iónico pueden ser más resistentes que los hidrogeles.

Michael Dickey, ingeniero químico de la Universidad Estatal de Carolina del Norte, y sus colaboradores han ideado un nuevo método para crear ionogeles con unas propiedades mecánicas que él describe como «las mejores de su clase [de materiales]». Son más difíciles de romper que el cartílago o el caucho, pero se mantienen suaves y elásticos. (Según Dickey, un cierto tipo de ionogel puede estirarse hasta siete veces su longitud, más del doble que una goma elástica.) Al igual que otros ionogeles, los compuestos que ha desarrollado su equipo conducen la electricidad y permanecen estables aunque varíe la temperatura. Y si se les aplica calor, pueden autorreparar un corte o desgarro. El nuevo material se describe en un estudio publicado en *Nature Materials*.

«Esos ionogeles transparentes son muy resistentes desde el punto de vista mecánico, y se distinguen por lo fáciles que son de preparar», señala Xuanhe Zhao, ingeniero mecánico del Instituto de Tecnología de Massachusetts que revisó el estudio, pero no participó en él de forma directa. Otros investigadores han desarrollado sus propios ionogeles, pero su fabricación suele implicar varios pasos o reacciones químicas complejas. Dickey y sus colaboradores simplemente añadieron los componentes básicos (o monómeros) de dos tipos distintos de polímeros a un líquido iónico y luego iluminaron la mezcla para conseguir que los monómeros se unieran en cadenas poliméricas. «En este caso, uno más uno es igual a 100», afirma Dickey. «Tomamos dos materiales que, por sí mismos, son comunes; pero, al ponerlos en ese nuevo entorno, obtenemos un gel notablemente resistente.»

Los ionogeles fáciles de fabricar podrían encontrar muchas aplicaciones. Su dureza y elasticidad los convierte en buenos candidatos para



AZMANL/GETTY IMAGES

Los ionogeles podrían usarse en la impresión 3D, para obtener baterías más duraderas o como protección frente a impactos.

amortiguar los impactos que se producen en los accidentes automovilísticos o las explosiones. Los ionogeles se solidifican al exponerlos a la luz, así que podrían servir para imprimir en 3D objetos difíciles de romper. Y, dado que sus iones transportan carga eléctrica, podrían utilizarse en baterías recargables, con la ventaja de que resistirían la degradación mejor que los electrolitos líquidos que se emplean en la actualidad.

Esas son solo algunas posibilidades, asegura Dickey. «Un material tan fácil de fabricar y con tan buenas propiedades», concluye, «está destinado a encontrar aplicaciones que escapan a mi imaginación».

Sophie Bushwick

BIOLOGÍA

UN NUEVO ACTOR EN EL ORIGEN DE LAS ESPINILLAS

Una reciente investigación dermatológica ahonda hasta la raíz del acné

THOMAS FUCHS

Si las espinillas tienen su origen en la piel sebosa, ¿por qué un lavado a fondo no impide que salgan? Un estudio reciente brinda una respuesta y podría sugerir una nueva línea de defensa.

Las espinillas, o puntos negros, albergan infecciones bacterianas diminutas y muy limitadas. La culpable más habitual es la bacteria *Cutibacterium acnes*, que vive sin causar problemas entre las células cutáneas hasta que aumenta el sebo de la piel y, ante la abundancia de nutrientes que eso genera, se multiplica sin control. Lo que pensamos que es el acné (las pústulas, el enrojecimiento y la hinchazón) son las consecuencias de una batalla librada entre el sistema inmunitario y las bacterias en proliferación, explica el dermatólogo Richard Gallo, de la Universidad de California en San Diego, que dirigió el nuevo estudio. «En la mayoría de los casos, no es que tengamos sucia la piel o no nos lavemos la cara lo suficiente. El problema reside en el modo en que nuestro sistema inmunitario se enfrenta contra las bacterias que supuestamente están allí», aclara.

Si imaginamos que el sistema inmunitario y las bacterias son dos equipos de fútbol, el acné es el césped maltrecho que queda al acabar el partido. El nuevo estudio señala a un jugador del equipo inmunitario que era desconocido hasta ahora y que resulta especialmente destrozón. Gallo y sus colaboradores dan a conocer en *Science Translational Medicine* que un tipo de célula estructural llamada fibroblasto (normalmente no considerada una célula inmunitaria) contribuye al desastre. En el curso de experimentos con ratones y muestras de piel humana, han descubierto que *C. acnes* fomenta la transformación de los fibroblastos en adipocitos que segregan una sustancia antimicrobiana, además de proteínas proinflamatorias. También descubrieron que los retinoides, una clase de potentes antiacneicos de uso habitual, funcionan en parte porque impiden la transformación de los fibroblastos y la liberación de proteínas irritantes.

Jonette Keri, dermatóloga clínica en la Facultad de Medicina Miller de la Universidad de Miami, que no ha participado en el estudio, califica el descubrimiento como un nuevo modo interesante de ver el acné. Los retinoides pueden causar efectos secundarios, así que afirma que descubrir un modo más específico de impedir la transformación de los fibroblastos sería un tratamiento fantástico.

Maddie Bender

PALEONTOLOGÍA

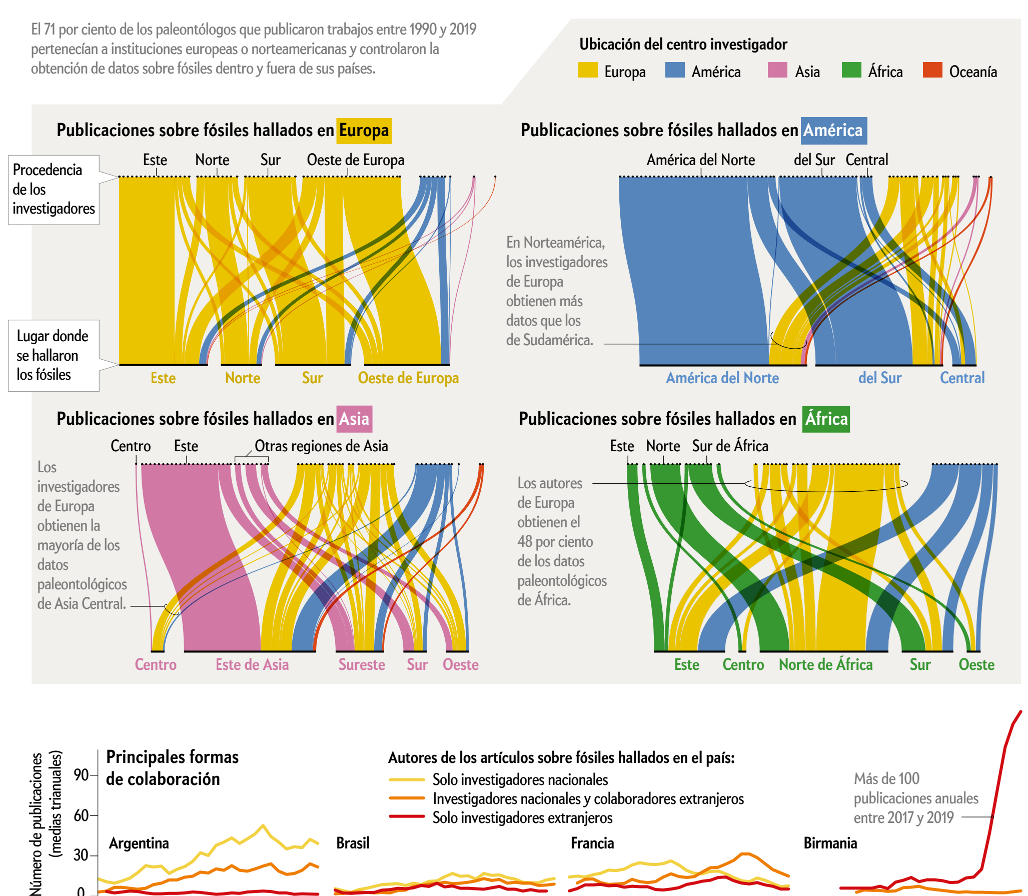
COLONIALISMO EN LA PALEONTOLOGÍA

Los expertos de unos pocos países controlan gran parte de los datos mundiales sobre fósiles

Las naciones ricas dominan de forma abrumadora las investigaciones paleontológicas, aun si los fósiles no se encuentran en sus territorios, según un reciente estudio. Los autores analizaron 26.409 investigaciones paleobiológicas publicadas entre 1990 y 2020, y hallaron que los científicos que trabajan en países con ingresos altos o medio-altos aportaron el 97 por ciento de ellas. Además, los expertos de las antiguas potencias coloniales controlaban de manera desproporcionada los fósiles de sus antiguas colonias. Por ejemplo, una cuarta parte de todos los científicos que realizaron estudios paleontológicos en Marruecos, Túnez y Argelia eran franceses; en el caso de Tanzania, el 17 por ciento de los autores eran alemanes; y el 10 por ciento de los investigadores que firmaron trabajos sobre fósiles sudafricanos y egipcios eran británicos.

«Resultó muy revelador», afirma Nussaïbah B. Raja-Schoob, paleontóloga de la Universidad de Erlangen-Núremberg y codirectora del estudio, publicado en *Nature Ecology & Evolution*. «Durante el colonialismo, ciertos países jugaban con ventaja. Tras la independencia, no transfirieron el conocimiento, así que muchas naciones tuvieron que empezar de cero y con menos dinero.»

Clara Moskowitz



La paleontología está muy arraigada en Argentina y Brasil, los dos países sudamericanos cuyos fósiles suscitan mayor interés, y los científicos locales realizan la mayoría de los estudios. En Francia, el principal destino europeo para los investigadores, han aumentado las colaboraciones entre paleontólogos locales y extranjeros. Desde 2015, los investigadores foráneos han mostrado un creciente interés por los fósiles de Birmania, en especial por los especímenes preservados en ámbar.

FUENTE: «COLONIAL HISTORY AND GLOBAL ECONOMICS DISTORT OUR UNDERSTANDING OF DEEP-TIME BIODIVERSITY», POR NUSSAÏBAH B. RAJA ET AL. EN *NATURE ECOLOGY & EVOLUTION*, VOL. 6, PÁGS. 145-154, FEBRERO DE 2022; YOUYOU ZHOU (*gráfico*)

EL **PIOJO** DE LA ABEJA

Su poderoso mecanismo de agarre podría imitarse y aplicarse en robots

El piojo de la abeja (*Braula coeca*, en realidad una mosca parásita áptera) demuestra una fuerza de agarre extraordinaria cuando viaja a lomos de su anfitriona. Ahora, un estudio revela cómo puede deambular por el cuerpo de la abeja con la mayor fuerza de agarre (en relación con el peso corporal) que se ha medido nunca en un insecto terrestre. Lo consigue gracias a unos pies especializados, o tarsos, provistos de uñas dentadas (*b*). Cada pie está rematado por 28 dientes, con los que se aferra a los «pelos» ralos (quetas) de la abeja melífera (*a* y *c*).

«Las uñas de los insectos suelen acabar en una sola punta, pero este díptero posee muchas», explica Thies Büscher, zoólogo de la Universidad de Kiel y autor del estudio. Estas se complementan con pliegues laterales en el pie que le permiten soltarse de la abeja con un simple giro, un rasgo que tal vez despertará el interés de quienes trabajan en el diseño inspirado en la biología, o biomimética. Los pies también están dotados de almohadillas que se adhieren con firmeza a las superficies lisas, como la cera de las colmenas.

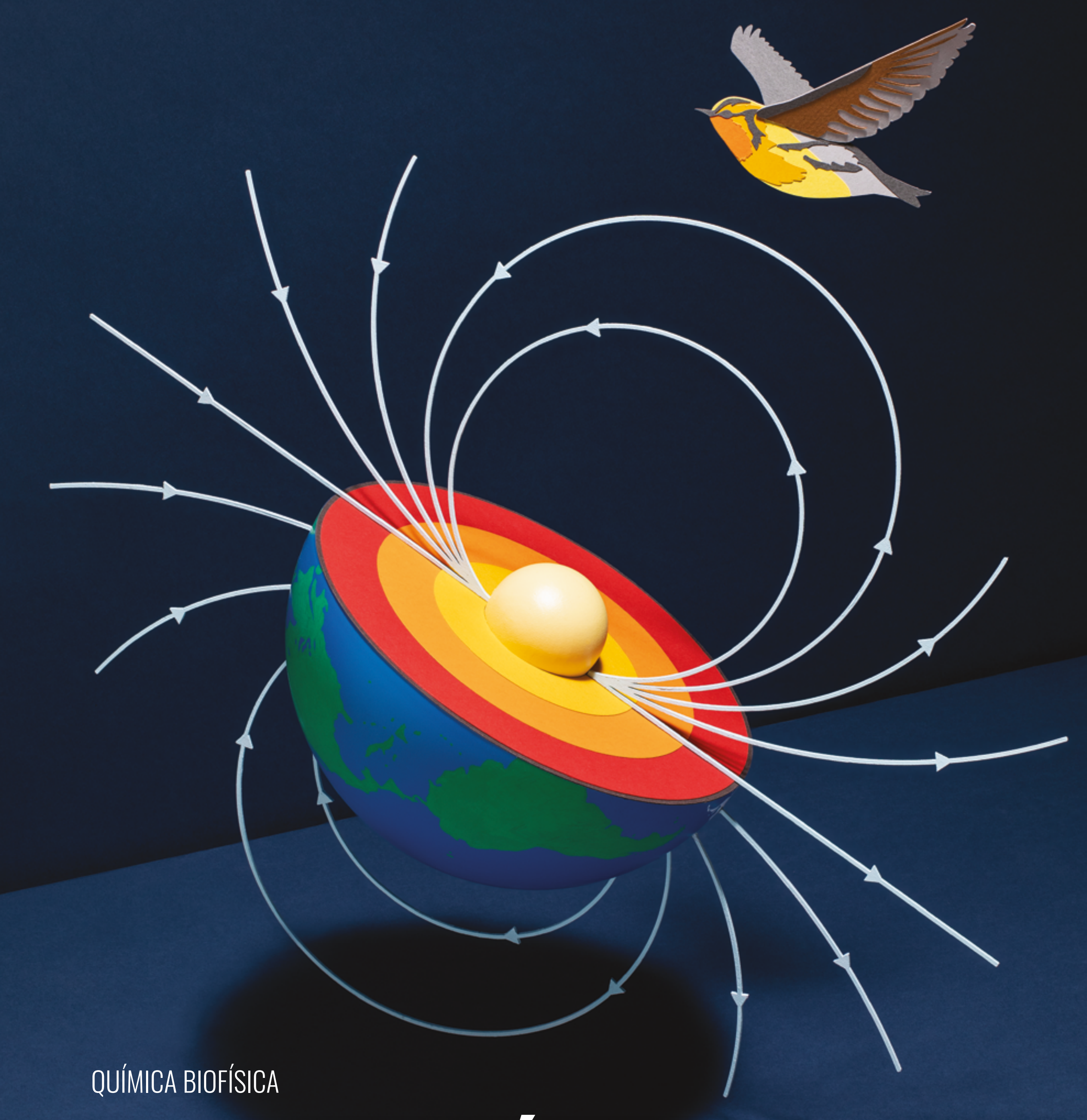
«Otros animales segregan adhesivos o se anclan con apéndices que dañan la superficie», aclara Büscher. El mecanismo de agarre de *B. coeca* es exclusivamente mecánico, por lo que tal vez podría ser adaptable a robots terrestres y subacuáticos.

La tecnología de fijación es un campo destacado de la biomimética. Pero los expertos en adherencia no siempre están al corriente de los hallazgos en campos como el de la fisiología de los insectos. «La biomimética se enfrenta al reto de difundir el conocimiento entre disciplinas estancas. Seguro que abriremos una gran puerta a la innovación cuando averigüemos cómo hacerlo mejor», concluye Jacobs.

Gary Hartley



FUENTE: «THE EXCEPTIONAL ATTACHMENT ABILITY OF THE ECTOPARASITIC BEE LOUSE BRAULA COECA (DIPTERA, BRAULIDAE) ON THE HONEYBEE», THIES H. BÜSCHER ET AL. EN *PHYSIOLOGICAL ENTOMOLOGY*, VOL. 47, PÁGS. 83-95, 2022.



QUÍMICA BIOFÍSICA

EL VALS CUÁNTICO DE LAS AVES MIGRATORIAS

Peter J. Hore y Henrik Mouritsen | La brújula interna que permite a ciertas aves recorrer enormes distancias entre sus zonas de cría e invernada parece basarse en una suerte de «baile» de espines electrónicos

KYLE BEAN

Imagine que es usted una joven aguja colipinta, un ave costera de gran tamaño, zanquilarga, de pico luengo e inquisitivo, nacida en la tundra de Alaska. A medida que se acortan los días y se aproxima el gélido invierno, siente el impulso de embarcarse en una de las migraciones más impresionantes del planeta: un vuelo transecuatorial de 12.000 kilómetros sin escalas, de al menos siete días y siete noches de duración, sobre el océano Pacífico y con destino a Nueva Zelanda. Un viaje a todo o nada. Cada año, decenas de miles de agujas colipintas consiguen completar el trayecto. Miles de millones de otras aves jóvenes, entre las que figuran currucas y papamoscas, charranes y andarríos, emprenden cada primavera migraciones igual de espectaculares y peligrosas, surcando con habilidad el cielo nocturno sin ninguna ayuda de los individuos más experimentados.

Desde hace siglos, las apariciones y desapariciones estacionales de las aves han desconcertado al ser humano. Aristóteles suponía que algunos pájaros, como las golondrinas, hibernaban durante los meses más fríos y que otros se transformaban en especies distintas: sugirió, por ejemplo, que los colirrojos se convertían en petirrojos para pasar el invierno. No ha sido hasta los últimos cien años cuando, gracias al anillamiento de aves, el seguimiento vía satélite y el auge de los estudios de campo, los investigadores han logrado relacionar las poblaciones de aves que invernan en una región y anidan en otra y demostrar que algunas cubren enormes distancias entre esos lugares [*véase* «El anillamiento científico de las aves», por Arantza Leal Nebot; Investigación y Ciencia, julio de 2021]. Resulta sorprendente que a menudo repitan las mismas rutas año tras año y que incluso los trotamundos más jóvenes sepan adónde ir. ¿Cómo hallan el camino?

Las aves migratorias usan las señales celestes para navegar, igual que los marineros de antaño se guiaban por el sol y las estrellas. Pero, a diferencia de los seres humanos, los pájaros también detectan el campo magnético generado por el núcleo fundido de la Tierra y lo aprovechan para establecer su posición y dirección. A pesar de que la recepción magnética (o «magnetorrecepción») de las aves lleva estudiándose más de 50 años, aún no hemos averiguado con exactitud cómo procesan esa información para mantener el rumbo. No obstante, estamos haciendo progresos para esclarecer el pertinaz enigma. Los indicios experimentales sugieren un fenómeno extraordinario: la brújula de las aves se basa en sutiles efectos cuánticos que se manifiestan en ciertos fragmentos moleculares efímeros, conocidos como pares radicales, que se forman en los ojos por vía fotoquímica. Es decir, las criaturas parecen ser capaces de «ver» las líneas del campo magnético terrestre y usar esa información para trazar una ruta entre sus zonas de cría e invernada.

En síntesis

Las aves migratorias son capaces de detectar el débil campo magnético de la Tierra y aprovecharlo para orientarse en sus largos viajes, una habilidad conocida como magnetorrecepción.

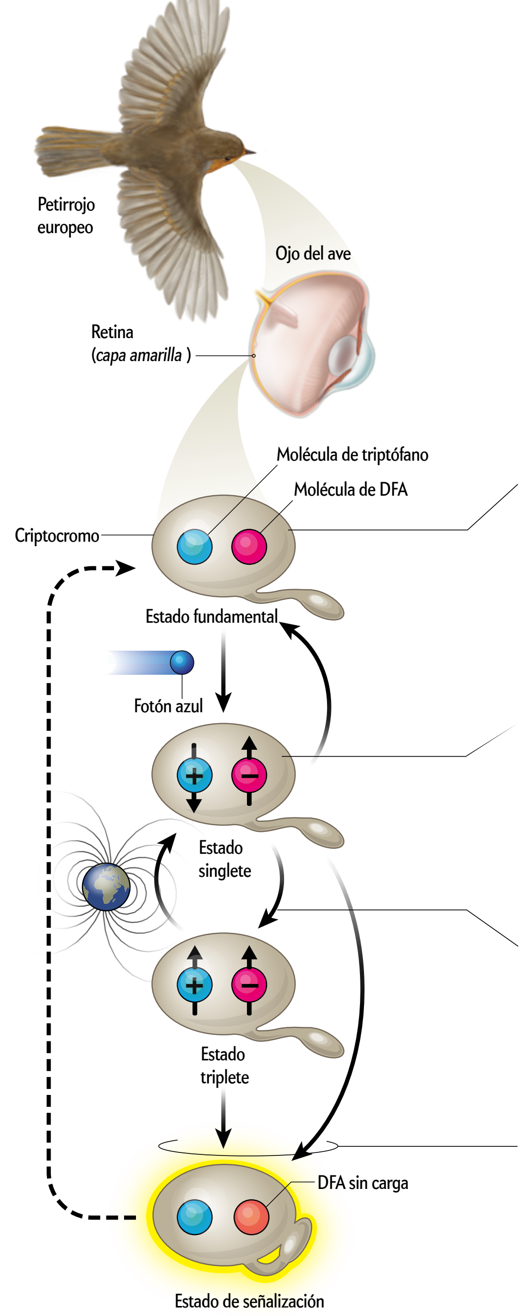
La brújula de las aves parece basarse en efectos cuánticos asociados al espín electrónico, que se manifiestan en ciertos fragmentos moleculares formados en la retina por vía fotoquímica.

Comprender el sistema interno de navegación de las aves podría servir para protegerlas de la actividad humana y aportar nuevas ideas de cara al desarrollo de sensores artificiales.

Un sentido misterioso

Las aves migratorias disponen de un reloj interno con un ritmo anual que les indica, entre otras cosas, cuándo migrar. También heredan de sus progenitores las direcciones en las que deben volar en otoño y primavera, y si los progenitores tienen rutas diferentes codificadas en sus genes, su descendencia tomará una intermedia. Si, por ejemplo, un ave que migra hacia el suroeste se cruza con otra que vuela hacia el sureste, las crías se dirigirán hacia el sur cuando llegue el momento. Pero ¿cómo saben los pájaros jóvenes dónde está el suroeste, el sur o el sureste? Cuentan al menos con tres brújulas distintas: una les permite extraer información de la posición del sol en el firmamento, otra usa la configuración de las estrellas en el cielo nocturno y la tercera se basa en el omnipresente campo magnético de la Tierra.

En su primer otoño, las aves jóvenes se rigen por instrucciones heredadas del tipo «volar durante tres semanas hacia el suroeste y luego dos semanas en dirección sursureste». Por lo general, si cometen un error y se desvían de su rumbo, no logran recuperarlo, pues aún care-



El sentido magnético de las aves

Los estudios sugieren que la brújula magnética de las aves migratorias se basa en los efectos cuánticos de los pares radicales, fragmentos moleculares de vida corta que se originan en los ojos por vía fotoquímica. Así, los pájaros logran percibir las líneas del campo magnético terrestre y usan esa información para orientarse en sus largos viajes.

❶ Los criptocromos, proteínas que se hallan en las células retinianas de las aves, contienen una molécula de dinucleótido de flavina y adenina (DFA) y un aminoácido triptófano. En el estado estable, estas moléculas son eléctricamente neutras y es probable que una pequeña parte de la proteína se extienda como una cola.

❷ Cuando un fotón de luz azul incide sobre el criptocromo, salta un electrón del triptófano al DFA. Las moléculas resultantes, cada una con un número impar de electrones, constituyen un par radical. En el estado singlete, los electrones desapareados tienen espines opuestos.

❸ La proteína activada oscila muy deprisa entre los estados singlete y triplete, donde los electrones tienen espines paralelos. La influencia del campo magnético terrestre determina la probabilidad de que domine cada estado.

❹ Ambos estados pueden sufrir reacciones químicas y pasar al «estado de señalización», donde el radical DFA ha ganado un protón y la cola parece acercarse al cuerpo de la proteína. El estado singlete también puede volver al estado fundamental. La proporción en que ocurren las posibles transiciones depende de la orientación del ave respecto al campo magnético terrestre.

❺ El estado de señalización del criptocromo activa una cascada bioquímica, que provoca la liberación de moléculas neurotransmisoras en la retina. Las señales continúan al cerebro, donde la información magnética que contienen se combina con otros datos direccionales para guiar el vuelo del ave.

❻ El criptocromo retorna a su estado fundamental y el proceso se repite (*flecha discontinua*).

JILLIAN DITNER (*aves y ojos*) Y JEN CHRISTIANSEN

cen de un mapa funcional que les indique dónde se encuentran. Esa es una de las razones por las que tan solo el 30 por ciento de los pequeños pájaros cantores sobreviven a su primer vuelo a la zona de invernada o al viaje de regreso. Durante su primera migración, las aves trazan un mapa en su cerebro que, en posteriores desplazamientos, les permitirá volar miles de kilómetros con una precisión de centímetros. Algunas siempre ponen sus huevos en el mismo nido y duermen sobre la misma percha en su hábitat invernal. Provistas de este mapa, en torno al 50 por ciento de las aves cantoras adultas logran retornar cada año a su lugar de anidación para reproducirse.

Las aves migratorias obtienen sus datos de navegación a través de diversos sentidos, sobre todo la vista, el olfato y la recepción magnética. Observando la rotación aparente de las estrellas alrededor de la estrella Polar, aprenden a localizar el norte antes de aventurarse en su primera migración; además, un reloj interno de 24 horas les permite calibrar su brújula solar. Por otro lado, los olores característicos pueden ayudar a los pájaros a reconocer lugares que han visitado antes. Los científicos conocen bastante bien los mecanismos biofísicos de los sentidos de la vista y el olfato de las aves. Sin embargo, el funcionamiento interno de su brújula magnética ha resultado más difícil de desentrañar.

Las aves migratorias obtienen sus datos de navegación a través de la vista, el olfato y la recepción magnética

El sentido magnético de los pájaros cantores que migran de noche destaca en varios aspectos importantes. En primer lugar, se ha observado que, al exponer a un ave enjaulada a campos magnéticos cuidadosamente controlados, su brújula no se comporta como la aguja de bitácora imantada de un barco. Los pájaros detectan el eje del campo magnético y el ángulo que forma con la superficie de la Tierra, que se denomina inclinación magnética. En los experimentos de laboratorio, invertir el campo magnético para que apunte en sentido opuesto no tiene ningún efecto sobre la capacidad del ave para orientarse correctamente. En segundo lugar, la percepción que tiene un pájaro del campo magnético terrestre puede verse alterada por campos magnéticos muy débiles que cambian de sentido varios millones de veces por segundo. Por último, a pesar de que los pájaros cantores vuelan de noche bajo el tenue brillo de las estrellas, su sentido magnético es fotodependiente, lo que apunta a una conexión entre este y la vista.

En 1978, en un intento de explicar esas características de la magnetorrecepción aviar, Klaus Schulten, que a la sazón trabajaba en el Instituto Max Planck de Química Biofísica de Gotinga, propuso que la brújula se basaba en transformaciones químicas sensibles al magnetismo. A primera vista, la idea parece absurda, pues la energía que puede aportar el campo magnético terrestre es demasiado baja para romper o debilitar de forma apreciable los enlaces entre los átomos de las moléculas. Schulten se inspiró en el descubrimiento, realizado 10 años antes, de que ciertos intermediarios químicos efímeros conocidos como pares de radicales poseen propiedades únicas que los hacen sensibles a interacciones magnéticas débiles. En los últimos 40 años, se han llevado a cabo cientos de experimentos sobre reacciones en las que intervienen pares de radicales y que se ven afectadas por la aplicación de campos magnéticos.

Para entender por qué los pares de radicales son tan especiales, tenemos que hablar de una propiedad cuántica del electrón: el momento angular de espín, o simplemente espín. Se trata de un vector que posee magnitud, dirección y sentido, y a menudo se representa mediante una flecha, ↑ o ↓, por ejemplo. Las partículas con espín presentan momento magnético, de modo que se comportan como imanes microscópicos. La mayoría de las moléculas poseen un número par de electrones que se organizan en parejas con espines opuestos (↑↓), los cuales se cancelan entre sí. Pero los radicales son moléculas que han perdido o ganado un electrón, lo que significa que contienen un electrón desapareado y, por lo tanto, presentan espín y momento magnético. Cuando en una reacción química se crean a la vez dos radicales, los dos electrones desapareados (uno en cada radical) pueden te-

ner espines antiparalelos (↑↓) o paralelos (↑↑), configuraciones que se conocen respectivamente como estados singlete y triplete.

Nada más formarse un par de radicales en estado singlete, los campos magnéticos internos hacen que los espines de los dos electrones bailen un complejo «vals» cuántico en el que el estado pasa de singlete a triplete y viceversa millones de veces por segundo, durante períodos de hasta unos pocos microsegundos. Y lo más relevante: en las condiciones adecuadas, un campo magnético externo puede inducir variaciones en esta danza. Schulten sugirió que este sutil efecto cuántico podía constituir la base de un sentido magnético, una brújula que respondería a estímulos ambientales un millón de veces más débiles de lo que se creía posible. Las investigaciones que hemos llevado a cabo en los últimos años sustentan esta hipótesis.

Un posible mecanismo

Para que una hipótesis sea útil, debe explicar hechos conocidos y proporcionar predicciones verificables. Dos aspectos del mecanismo propuesto por Schulten concuerdan con lo que sabemos sobre la brújula de las aves: los pares de radicales no se ven afectados por las inversiones de un campo magnético externo y suelen formarse cuando las moléculas absorben luz. Dado que la brújula magnética de las aves es fotodependiente, una predicción de la hipótesis de Schulten es que los ojos desempeñan una función en el sistema sensorial magnético. Hace unos 10 años, uno de nosotros (Mouritsen) descubrió con su grupo de la Universidad de Oldenburg que una región del cerebro llamada grupo N, encargada de recibir y procesar la información visual, es de lejos la parte del cerebro más activa cuando ciertas aves migratorias nocturnas emplean su brújula magnética. Una investigación con petirrojos europeos reveló que, si esa región es disfuncional, los pájaros aún pueden servirse de sus brújulas solar y estelar, pero son incapaces de orientarse mediante el campo magnético terrestre. Gracias a este tipo de experimentos, parece claro que los sensores magnéticos de las aves se encuentran en la retina.

Una de las primeras objeciones a la hipótesis del par de radicales fue que nunca se había constatado que campos magnéticos tan pequeños como el terrestre (entre 10 y 100 veces más débiles que el de un imán para la nevera) pudieran alterar una reacción química. Para abordar





El petirrojo europeo (*arriba*) y la aguja colipinta (*abajo*) son dos de las muchas aves migratorias que cubren largas distancias.

ADRIAN COLEMAN/GETTY IMAGES (*petirrojo*); IMOGEN WARREN/GETTY IMAGES (*aguja*)

esta cuestión, Christiane Timmel, de la Universidad de Oxford, y sus colaboradores eligieron una molécula distinta a cualquiera de las que uno esperaría encontrar en el interior de un ave: constaba de dos partes, una donante y otra aceptora de electrones, enlazadas por medio de un puente molecular. Cuando se hacía incidir luz verde sobre ellas, un electrón saltaba de la molécula donante a la aceptora, situada a unos 4 nanómetros. El par de radicales formado mediante este proceso era muy sensible a las inte-

racciones magnéticas débiles, y eso demostraba que las reacciones en las que intervenían pares de radicales podían verse influidas por la presencia —y lo que es más importante, por la dirección— de un campo magnético de intensidad similar al terrestre.

La hipótesis de Schulten también implica que en la retina deben existir moléculas sensoriales (receptores magnéticos) donde puedan crearse pares de radicales sensibles al magnetismo a partir de las longitudes de onda necesarias para que funcione la brújula de las aves. Estas se sitúan en la región azul del espectro, como había probado otra línea de investigación. En el año 2000, Schulten sugirió que ese proceso fotoquímico podría ocurrir en el criptocromo, una proteína recién descubierta.

El sentido magnético de las aves parece basarse en sutiles efectos cuánticos, asociados a especies moleculares de vida corta generadas en la retina por vía fotoquímica

Los criptocromos se encuentran en plantas, insectos, peces, aves y seres humanos. Desempeñan diversas funciones, como el control del crecimiento de las plantas en función de la luz o la regulación de los ritmos circadianos. Su atractivo como posibles sensores magnéticos radica en que son los únicos fotorreceptores conocidos de los vertebrados que forman pares de radicales al absorber luz azul. Se han hallado 6 tipos de criptocromos en los ojos de las aves migratorias, y en los últimos 20 años no se ha postulado ninguna otra molécula magnetorreceptora candidata.

Como cualquier proteína, los criptocromos se componen de cadenas de aminoácidos plegadas en complejas estructuras tridimensionales. En el centro de muchos criptocromos hay una molécula de color amarillo llamada dinucleótido de flavina y adenina (DFA), la cual absorbe la luz azul, a diferencia del resto de la proteína. Incluida entre los 500 aminoácidos que conforman un criptocromo típico, una cadena más o menos lineal de tres o cuatro moléculas del aminoácido triptófano se extiende desde la superficie de la proteína hasta el DFA. En el momento en que este absorbe un fotón azul, un electrón de la molécula de triptófano más cercana salta a la flavina del DFA. Ese primer triptófano atrae a un electrón del segundo, y así sucesivamente, de modo que la cadena de triptófanos se comporta como una especie de cable molecular. El resultado neto es un par de radicales, formado por un radical DFA con carga negativa en el centro de la proteína y un radical triptófano con carga positiva situado en la superficie, a 2 nanómetros de distancia.

En 2012, uno de nosotros (Hore), en colaboración con colegas de Oxford, estudió la idoneidad del criptocromo como sensor magnético. En los experimentos se empleó el criptocromo 1, una proteína que se encuentra en *Arabidopsis thaliana*, la planta donde se habían descubierto los criptocromos 20 años antes. Utilizando pulsos láser de corta duración para producir pares de radicales en las proteínas purificadas, hallamos que era posible alterar las reacciones posteriores aplicando campos magnéticos. Los resultados eran alentadores, pero, por supuesto, las plantas no migran.

Hubo que esperar casi diez años antes de poder efectuar mediciones similares en un criptocromo de un ave migratoria. El primer problema fue decidir cuál de los seis criptocromos aviares estudiaríamos. Elegimos el criptocromo 4a (CRY4a), en parte, porque se une al DFA con mucha más fuerza que otros de sus homólogos (y si la proteína no contiene DFA, no se formarán pares de radicales ni presentará sensibilidad magnética). Los experimentos también mostraron que los niveles de CRY4a en las aves migratorias son mayores en primavera y otoño, las estaciones en las que se desplazan. Las simulaciones por ordenador realizadas por Ilia Solov'yov en Oldenburg mostraron que el CRY4a del petirrojo europeo posee una cadena de cuatro triptófanos, uno más que el CRY1 de *Arabidopsis*. Como es natural, nos preguntamos si las aves migratorias habrían desarrollado esa cadena más larga para favorecer la detección magnética.

El siguiente reto fue conseguir grandes cantidades de CRY4a de petirrojo de elevada pureza. Lo resolvió Jingjing Xu, doctoranda en el laboratorio de Mouritsen: tras optimizar las condiciones experimentales, logró usar cultivos bacterianos para obtener muestras de proteína con el DFA unido de manera correcta. Además, preparó distintas versiones de la proteína donde se sustituía uno de los triptófanos por un aminoácido distinto, a fin de bloquear el tránsito de electrones en cada una de las cuatro posiciones de la cadena. El análisis de estas versiones alternativas de la proteína nos permitiría comprobar si los electrones realmente atravesaban toda la cadena de triptófanos.

Enviamos las muestras —los primeros criptocromos purificados procedentes de un animal migratorio— a Oxford, donde Timmel y su marido, Stuart Mackenzie, las estudiaron mediante las sensibles técnicas basadas en láser que habían desarrollado a tal fin. Sus grupos de investigación hallaron que los radicales triptófano situados en la tercera y cuarta posición de la cadena son sensibles al magnetismo cuando se emparejan con el radical DFA. Sospechamos que los cuatro aminoácidos cooperan para ofrecer una detección magnética, señalización bioquímica y orientación eficientes. Asimismo, especulamos que la presencia del cuarto triptófano podría mejorar la etapa inicial de la transducción de la señal, el proceso por el que los impulsos nerviosos que codifican la dirección del campo magnético se generan y, en última instancia, se transmiten por el nervio óptico hasta el cerebro. Nuestros experimentos actuales se encaminan a identificar las proteínas que interactúan con el CRY4a.

Cabe mencionar aún otro hallazgo sobre el criptocromo. Al comparar el CRY4a del petirrojo con otros dos CRY4a muy similares procedentes de dos aves no migratorias, la paloma y la gallina, constatamos que la proteína del petirrojo presentaba mayor sensibilidad magnética. Y eso sugiere que la evolución podría haberla optimizado para la navegación.

Cuestiones sin resolver

Esos experimentos confirman que el CRY4a posee algunas de las propiedades que precisa un receptor magnético, pero aún estamos lejos de poder explicar cómo perciben las aves migratorias las líneas del campo terrestre. Un paso crucial consistirá en determinar si de verdad se producen pares de radicales en los ojos de dichas aves.

La manera más prometedora de comprobarlo se inspira en el trabajo de algunos químicos y físicos que, en los años ochenta, demostraron que los campos magnéticos variables alteran el modo en que las reacciones de los pares de radicales responden a los campos estáticos. Sus resultados predecían que un débil campo electromagnético que oscilara con las mismas frecuencias de radio que el «vals singlete-triplete» podría afectar a la capacidad de las aves para usar su brújula magnética. En el año 2004, Thorsten Ritz, de la Universidad de California en Irvine, y sus colaboradores fueron los primeros en corroborar este hecho.

En 2007, Mouritsen emprendió experimentos conductuales similares en su laboratorio de Oldenburg, aunque los resultados arrojaron diferencias intrigantes. En primavera y otoño, las aves que viajan entre las zonas de anidación e invernada exhiben un comportamiento denominado *Zugunruhe*, o inquietud migratoria, como si estuvieran ansiosas por ponerse en camino. En cautividad, esas mismas aves se orientan de manera instintiva en la dirección en la que volarían si estuvieran libres. Mouritsen descubrió que los petirrojos europeos alojados en cabañas de madera en el campus de la universidad eran incapaces de orientarse con su sentido magnético. Sospechó que el débil ruido de radiofrecuencia (lo que en ocasiones se denomina contaminación electromagnética o electropolución) generado por los equipos electrónicos de los laboratorios cercanos interfería con la brújula interna de las aves.

Con el objetivo de confirmar que el problema se debía a la contaminación electromagnética, Mouritsen y su equipo revistieron las cabañas con láminas de aluminio para bloquear las radiofrecuencias parásitas. Las noches en las que el blindaje se conectaba a tierra y funcionaba correctamente, las aves se orientaban según el campo magnético terrestre, mientras que las demás noches revoloteaban de manera errática. En un establo de madera sin apantallar, situado a unos kilómetros de la ciudad y lejos de aparatos electrónicos, las mismas aves no tuvieron dificultades para detectar la dirección del campo magnético.

Esos resultados son importantes por varios motivos. Si los campos de radiofrecuencia afectan al sensor magnético y no, por ejemplo, a al-

gún componente de la vía de señalización que transmite los impulsos nerviosos al cerebro, eso constituiría una prueba convincente de que la brújula magnética de las aves se basa en un mecanismo de pares de radicales. La principal hipótesis alternativa, que en la actualidad cuenta con mucho menos respaldo, vincula los sensores a minerales magnéticos que contienen hierro. Pero cualquier partícula de este tipo que tuviera el tamaño suficiente para alinearse como la aguja de una brújula en el campo magnético terrestre sería demasiado grande para girar en un campo de menor intensidad que invirtiera su sentido millones de veces por segundo. Además, los campos de radiofrecuencia que frustran la orientación magnética de las aves son increíblemente débiles, y aún no entendemos bien cómo podrían corromper la información direccional que brinda el campo magnético terrestre, mucho más intenso.

También cabe destacar que el ruido de radiofrecuencia de banda ancha (campos magnéticos que fluctúan de forma aleatoria con un intervalo de frecuencias) desorientaba a los pájaros del laboratorio de Oldenburg con mucha más eficacia que los campos de una sola frecuencia en los que se centraron Ritz y su equipo. Esperamos que, al someter a las aves cantoras migratorias a ruido de radiofrecuencia en distintas bandas, consigamos determinar si los sensores se basan realmente en pares de radicales DFA-triptófano o si podría intervenir otro par de radicales, como han propuesto algunos investigadores.

Aún persisten numerosos interrogantes acerca de la brújula de las aves, por ejemplo si los efectos de los campos magnéticos sobre el CRY4A del petirrojo que se han observado *in vitro* se producen también *in vivo*. También queremos comprobar si, al suprimir genéticamente la síntesis de CRY4A, las aves migratorias siguen siendo capaces de orientarse mediante su brújula magnetica. Si logramos probar que el sentido magnético *in vivo* se basa en un mecanismo de pares de radicales, habremos demostrado que un sistema sensorial biológico puede responder a estímulos millones de veces más débiles de lo que creíamos posible. Eso nos ayudaría a entender mejor la percepción biológica y aportaría nuevas ideas de cara al desarrollo de sensores artificiales.

Tratar de comprender a fondo el sistema interno de navegación de las aves migratorias no constituye un mero ejercicio académico. Debido a las enormes distancias que recorren, estas especies afrontan amenazas más graves para su supervivencia que la mayoría de aves que se reproducen y pasan el invierno en el mismo sitio. Resulta más difícil protegerlas de los efectos perjudiciales de la actividad humana, la destrucción del hábitat y el cambio climático [*véase* «El impacto humano en las aves migratorias», por José Luis Tellería; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, julio de 2016]. Reubicar ejemplares migratorios lejos de los ecosistemas dañados casi nunca funciona, pues las aves tienden a regresar por instinto a esos lugares que se han tornado inhóspitos. Confiamos en que, al aportar nuevos datos sobre los mecanismos que emplean estos extraordinarios navegantes para orientarse, los conservacionistas tengan más opciones de «convencer» a los ejemplares migrantes de que un nuevo hábitat más seguro es su hogar.

La próxima vez que vea un pequeño pájaro cantor, piense por un momento en que quizá acabe de recorrer miles de kilómetros, navegando con gran habilidad por medio de un cerebro que no pesa más de un gramo. El hecho de que la dinámica cuántica del espín pueda haber desempeñado un papel crucial en su viaje no hace sino aumentar el asombro y la admiración con que debemos contemplar a estas excepcionales criaturas.

Peter J. Hore es químico en la Universidad de Oxford. Estudia la química biofísica de los espines electrónicos y nucleares, y sus efectos en procesos como los mecanismos de magnetorrecepción en animales.



Henrik Mouritsen es biólogo en la Universidad de Oldenburg. Investiga los mecanismos de orientación y navegación de diversos animales, con especial interés en las aves cantoras que migran de noche.



PARA SABER MÁS

The radical-pair mechanism of magnetoreception. Peter J. Hore y Henrik Mouritsen en *Annual Review of Biophysics*, vol. 45, págs. 299-344, julio de 2016.

Long-distance navigation and magnetoreception in migratory animals. Henrik Mouritsen en *Nature*, vol. 558, págs. 50–59, junio de 2018.

Magnetoreception in birds. Roswitha Wiltschko y Wolfgang Wiltschko en *Journal of The Royal Society Interface*, vol. 16, art. 20190295, septiembre de 2019.

EN NUESTRO ARCHIVO

Navegación animal. María Luisa Fanjul y Aldi De Oyarzábal en *IyC*, diciembre de 2007.

Vivir en un mundo cuántico. Vlatko Vedral en *IyC*, agosto de 2011.

La brújula interna. Davide Castelvecchi en *IyC*, marzo de 2012.



VIROLOGÍA

LA NATURALEZA EVASIVA DE ÓMICRON

Megan Scudellari | Ciertas mutaciones de esta variante del coronavirus la ocultan ante el sistema inmunitario y la hacen muy contagiosa

ISTOCK: NAEBLYS

La variante ómicron del SARS-CoV-2 probablemente sea el virus que se ha propagado con mayor rapidez en la historia de la humanidad. Un enfermo de sarampión, quizás el virus y el microbio más infeccioso de todos, puede infectar a una quincena de personas en 12 días. Pero cuando el pasado invierno irrumpió ómicron, era tal su rapidez que un infectado podía contagiar a seis individuos al cabo de cuatro días, a 36 en ocho días y a 216 en doce. A finales de febrero era la responsable de casi todas las infecciones de COVID-19 en los Estados Unidos.

Cuando la variante alfa surgió en noviembre de 2020, poco se sabía sobre la influencia que sus escasas mutaciones tendrían en su comportamiento. Ahora, tras un año acumulando datos y conocimientos, se ha podido relacionar una parte del medio centenar de mutaciones de ómicron con los mecanismos que han impulsado su propagación con semejante rapidez y eficacia. Sriram Subramaniam, bioquímico de la Universidad de la Columbia Británica, en Canadá, apunta que ese tipo de averiguaciones suelen tardar mucho más, «pero como llevamos un año examinándolas, ya estamos preparados».

Ómicron alberga el doble de mutaciones que otras variantes preocupantes; el sublinaje BA.2 de esta variante aloja todavía más cambios. Contiene 13 mutaciones en la proteína de la espícula rara vez vistas en otras variantes y que provocan cambios en su morfología que lo dotan de nuevas capacidades sorprendentes. Si delta era la variante Hulk, la fuerza bruta, ómicron sería como Flash, enmascarada y rápida como el rayo.

Vamos a explorar las cuatro maneras en que la variante ha cambiado: tres le permiten eludir el sistema inmunitario y la vuelven más infecciosa, mientras que la cuarta podría ser la responsable de que ocasione una enfermedad más leve.

En síntesis

La variante ómicron del coronavirus SARS-CoV-2 ha batido todas las marcas de velocidad y extensión del contagio.

Esa capacidad se explicaría por la acumulación de mutaciones en las espículas, variaciones que impiden que sea reconocido por los anticuerpos del sistema inmunitario y, al mismo tiempo, simplifican su entrada en las células.

Por suerte, esa gran infecciosidad tiene como contrapartida una merma en su capacidad de penetración en el pulmón, por lo que no es tan virulenta como otras variantes del coronavirus.

Lleva un disfraz: La mayoría de los datos indican que lo que hace tan contagiosa a ómicron es un potente mecanismo exclusivo: una capacidad sin parangón para burlar al sistema inmunitario.

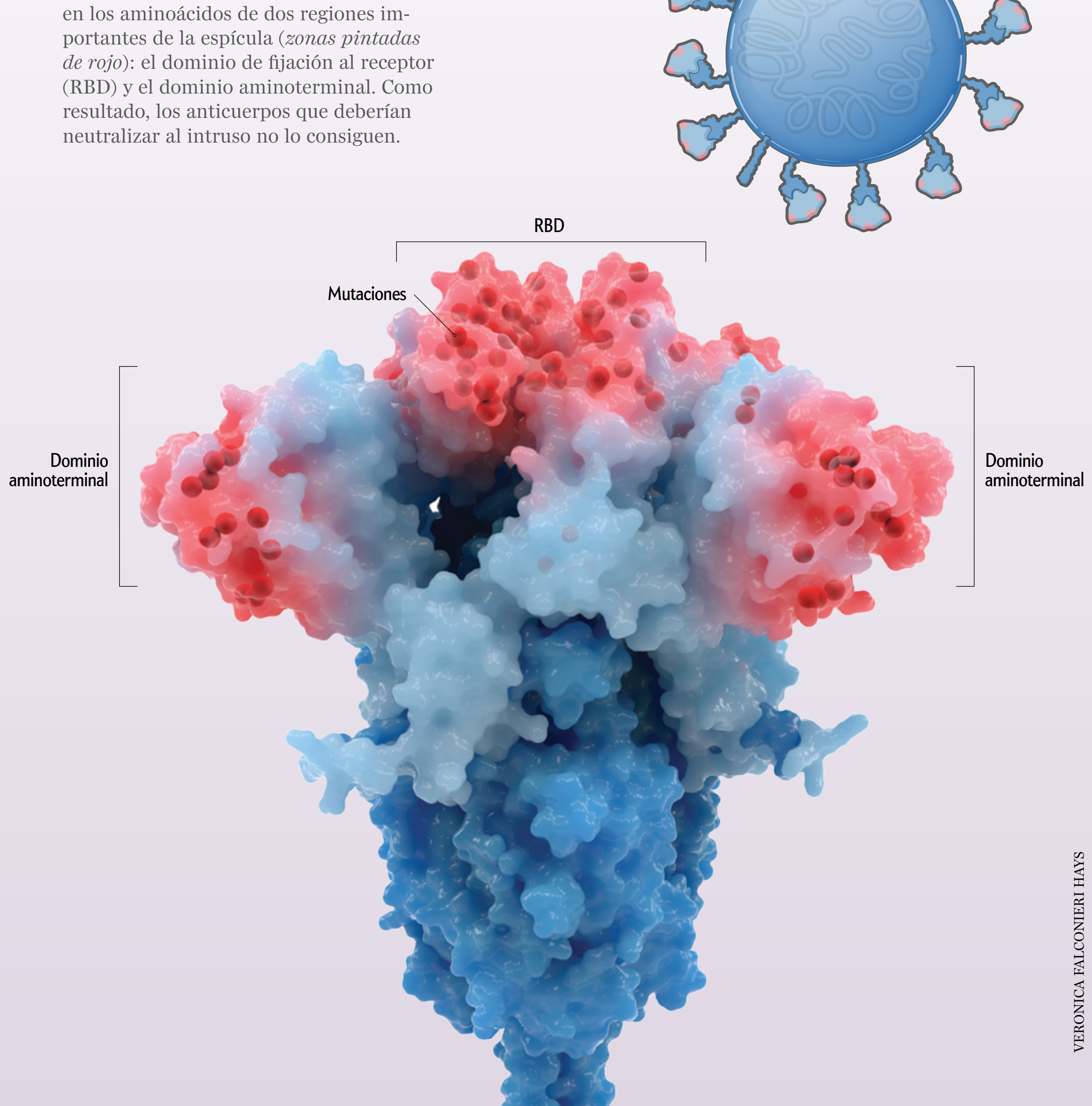
Durante la infección, una aglomeración de aminoácidos en forma de puño situada en el extremo de la espícula del coronavirus (el dominio de fijación al receptor, o RBD, por su nombre en inglés) se acopla a su receptor (la proteína ACE2, que exponen algunas células humanas). A fin de impedir que esa adhesión desate la enfermedad, el sistema inmunitario sintetiza anticuerpos (proteínas con forma de Y que han sido inducidas por una infección pretérita o una vacuna) que reconocen el RBD, se pegan a él como el velcro e impiden que el virus entre en contacto con la ACE2.

En las variantes previas del virus estaban mutados uno, dos o a lo sumo tres aminoácidos del RBD, lo que los modificaba lo justo para impedir que algunos anticuerpos lo reconocieran, pero no todos. En cambio, ómicron aloja 15 mutaciones en el RBD, la mayoría en los principales sitios a los que se fijan los anticuerpos, que urden un elaborado disfraz con el que burla a un gran número de ellos. Es como si se colocara una auténtica careta de látex al estilo de *Misión imposible* para cambiar de aspecto. Según Matthew McCallum, bioquímico de la Universidad de Washington, «contiene muchas mutaciones muy nuevas».

En un análisis publicado en la revista *Science* junto a David Veesler, su jefe de laboratorio, y otros colaboradores, McCallum dio a conocer una consecuencia de esa drástica transformación: solo uno de los ocho tratamientos con anticuerpos contra la COVID-19 usados en los hospitales (basados en anticuerpos naturales) seguía fijándose a los RBD. Otra investigación ha demostrado que las mutaciones del RBD y de un segundo sitio (el dominio aminoterminal) permiten que el virus escape de los anticuerpos generados por la vacunación

o la infección. Gracias al convincente disfraz de ómicron, la variante no tiene nada que la frene, con lo que se propaga a la velocidad del rayo. Aun así, las vacunas consiguen mantener a raya la enfermedad grave, sobre todo tras las inyecciones de refuerzo.

Está estabilizada: Cuando la espícula de ómicron experimentó la drástica alteración que la escuda ante el sistema inmunitario, los cambios eliminaron algunos restos químicos necesarios para fijarse a la ACE2. Pero ese inconveniente ha quedado compensado por nuevas



Evasión del sistema inmunitario

Los anticuerpos atacan al nuevo coronavirus SARS-CoV-2 fijándose a la superficie de sus espículas, pero la variante ómicron posee muchas mutaciones (*esferas rojas*) en los aminoácidos de dos regiones importantes de la espícula (*zonas pintadas de rojo*): el dominio de fijación al receptor (RBD) y el dominio aminoterminal. Como resultado, los anticuerpos que deberían neutralizar al intruso no lo consiguen.

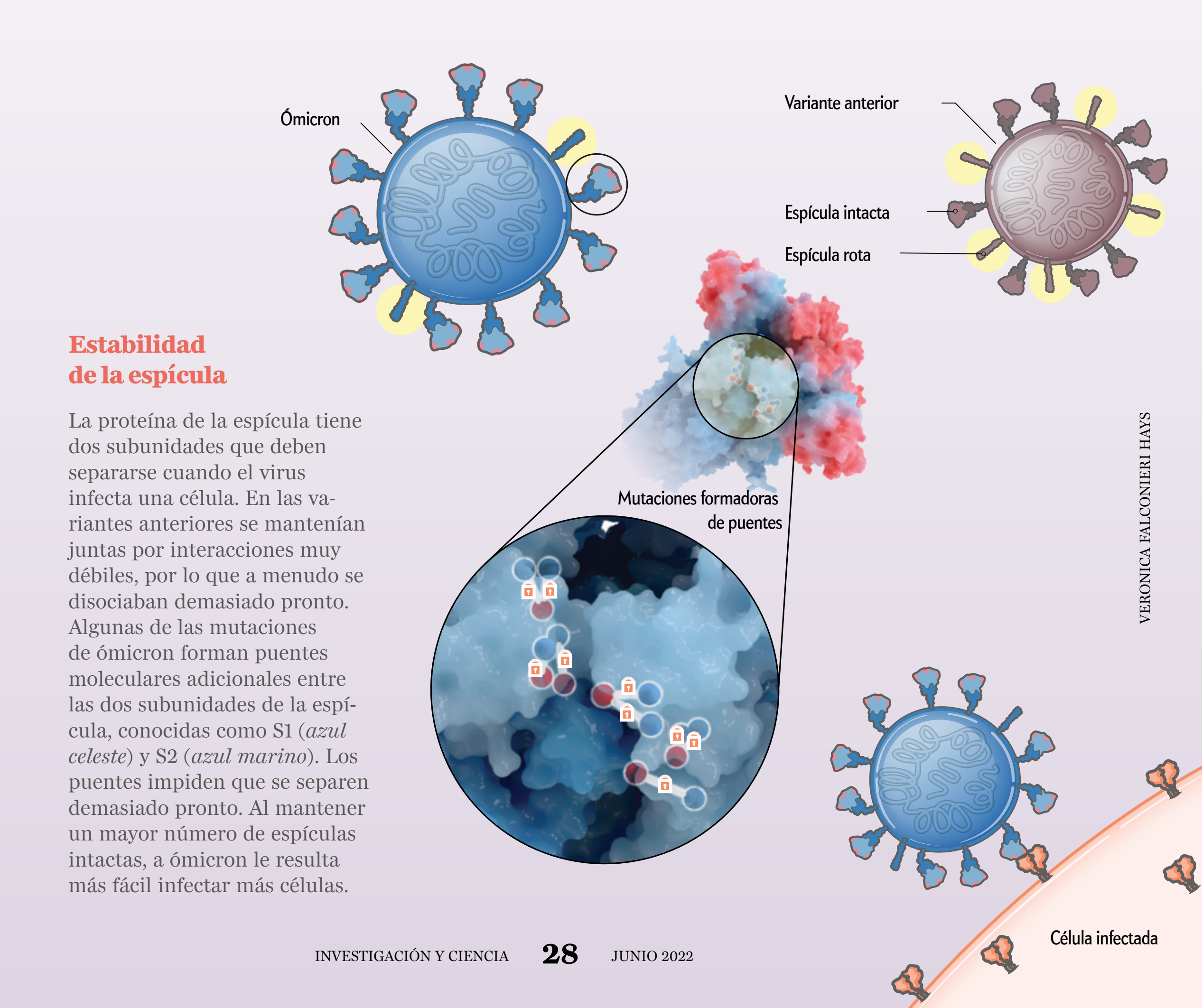
mutaciones: los RBD forman nuevos puentes químicos con los que se siguen fijando a la proteína, según otro estudio publicado en *Science*. El autor principal del artículo, Subramaniam, afirma que «la variante ha perdido algunos restos importantes para la fijación, pero ahora lo hace con otras interacciones».

La proteína de la espícula también se volvió más recia. En las otras variantes, sus dos subunidades, S1 y S2, mantienen una conexión más débil que les permite separarse rápidamente para que la espícula pueda hundirse en la célula humana cuando se topa con ella. La contrapartida de esa delicada disposición estriba en que antes del acercamiento muchas espículas se rompen prematuramente. Y esos peplómeros rotos no permiten que el coronavirus se fije a su diana.

Según varios estudios (un artículo se publicó en *Journal of Medical Virology* y los demás se distribuyeron como prepublicaciones, sin la revisión formal por terceros), gracias a esas mutaciones las subunidades de ómicron se mantienen unidas con más fuerza mediante menos puentes moleculares. «El virus se asegura de no desatar su activación prematura», explica Shan-Lu Liu, autor de uno de los artículos y director del programa de virus y patógenos emergentes de la Universidad Estatal de Ohio. «Solo se activará y penetrará en la célula en el lugar y en el momento idóneos, no antes.»

Por la puerta de atrás: Las variantes anteriores compartían algo en común: para atravesar la membrana celular necesitaban una proteína de la superficie celular denominada TMPRSS2. Pero ómicron no la necesita y entra por otro lugar; en vez de derribar la puerta principal, se cuela por la de atrás.

Mientras que las otras variantes necesitan las proteínas ACE2 y TMPRSS2 para inyectar el genoma del virus en la célula, ómicron solo



Estabilidad de la espícula

La proteína de la espícula tiene dos subunidades que deben separarse cuando el virus infecta una célula. En las variantes anteriores se mantenían juntas por interacciones muy débiles, por lo que a menudo se disociaban demasiado pronto. Algunas de las mutaciones de ómicron forman puentes moleculares adicionales entre las dos subunidades de la espícula, conocidas como S1 (*azul celeste*) y S2 (*azul marino*). Los puentes impiden que se separen demasiado pronto. Al mantener un mayor número de espículas intactas, a ómicron le resulta más fácil infectar más células.

se fija a ACE2 para entrar envuelta en una burbuja hueca, denominada endosoma. Una vez dentro, se deja llevar por el interior de la célula hasta que la hace estallar y comienza a tomar el mando.

Esto le proporcionaría dos ventajas. La primera es que, dado que muchas células no presentan la TMPRSS2 en el exterior, se amplía la variedad de células infectables. «Se especula que, a través de los endosomas y sin el concurso de la TMPRSS2, el virus tiene ahora a su disposición entre siete y diez veces más células», indica Wendy Barclay, viróloga en el Colegio Imperial de Londres, cuyo equipo describió en una prepublicación la nueva vía de entrada.

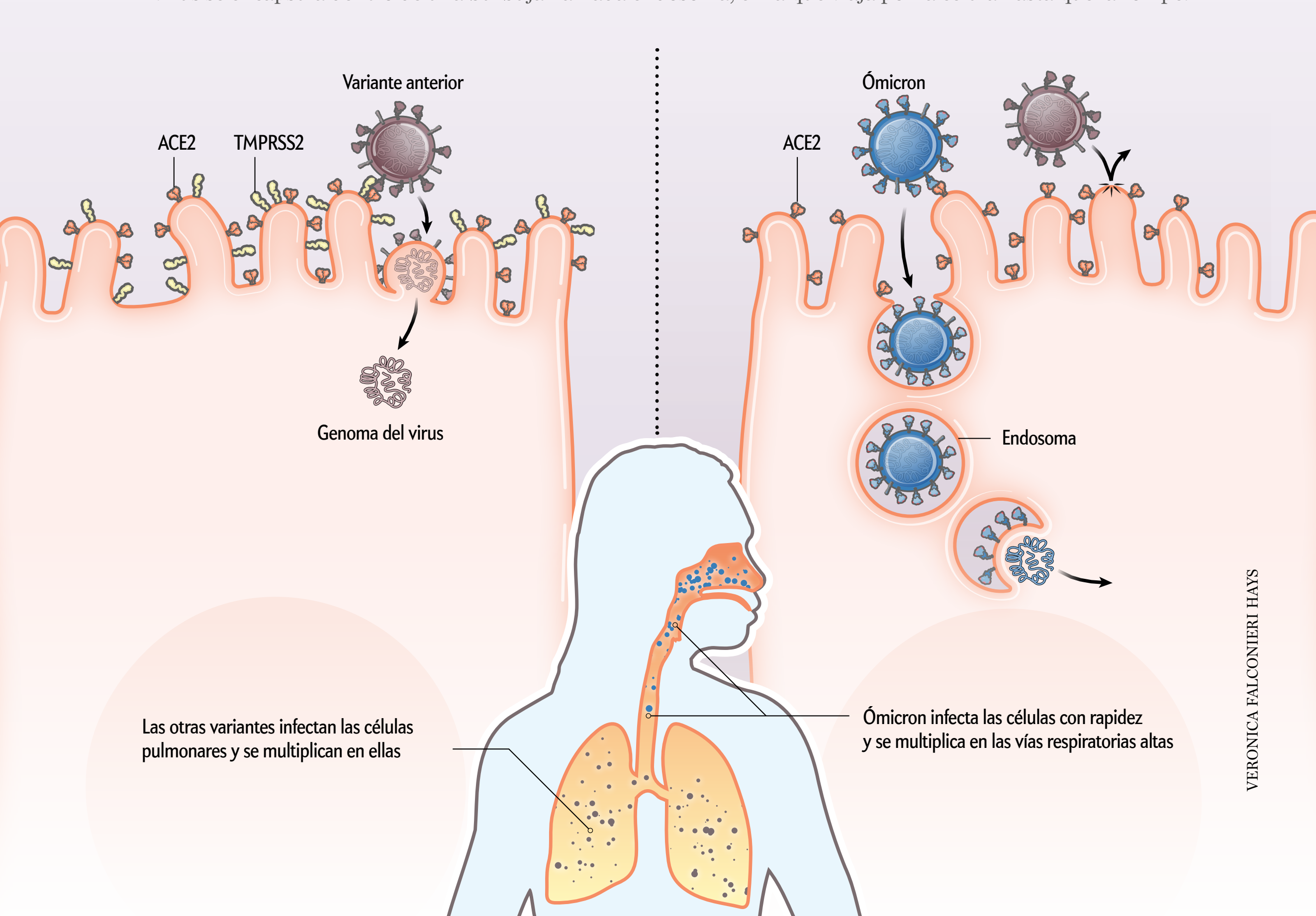
La segunda es que, mientras que la variante delta tenía que adentrarse en los pulmones para infectar las células que exponen la TMPRSS2, la ómicron se replica rápidamente en las vías respiratorias altas, lo que probablemente facilita el contagio. Según Joe Grove, virólogo de la Universidad de Glasgow y coautor de una prepublicación donde también se describe la nueva vía de entrada, «quizás estemos observando el desplazamiento hacia las vías respiratorias altas, lo que favorece el contagio a través de la tos, los estornudos y demás».

Más vulnerable: Por último, a diferencia de los tres anteriores, el cuarto cambio de ómicron no la hace más infecciosa, sino que crea en ella una debilidad sorprendente que la hace más vulnerable a una parte de las defensas del organismo conocida como el sistema inmunitario innato.

Los científicos evaluaron la respuesta de ómicron y delta a los interferones, pequeñas proteínas que actúan como las balizas de las autopistas

Otra vía de entrada

Las variantes precedentes del virus se sirven de las proteínas ACE2 y TMPRSS2 como llave de entrada a la célula. Gracias a ambas, se fusionan con la membrana celular antes de inyectar el material genético del virus. A ómicron le basta con la ACE2 para entrar, de modo que es capaz de infectar a las células que carecen de la TMPRSS2. El virus se encapsula dentro de una burbuja llamada endosoma, en la que viaja por la célula hasta que la rompe.



y alertan de la invasión a las células inmunitarias innatas. Delta era experta en doblegar la respuesta interferónica, pero ómicron lo hace tan mal que acaba activando esta vía de señalización.

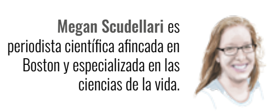
Todavía no se sabe cómo sobrevino el cambio. Al menos 11 de las 26 proteínas del coronavirus interaccionan con el sistema de interferones y muchas aparecen mutadas en la variante ómicron. Pero aun sin conocer el mecanismo exacto, hay pistas de las consecuencias de dichas alteraciones.

Dado que los pulmones tienen una respuesta interferónica más pronunciada que las vías respiratorias altas, la vulnerabilidad de ómicron a esa reacción evitaría que se interne en el aparato respiratorio. Para Martin Michaelis, biólogo de la Universidad de Kent, en Inglaterra, que analizó cómo ómicron interacciona con el interferón en un artículo publicado en *Cell Research*, «le da sentido a lo que observamos: ómicron no es capaz de penetrar tanto en el cuerpo y los pulmones, cosa que le impide ocasionar un cuadro grave».

El impacto de ómicron en la población no ha sido leve, pues ha provocado un gran aumento de los ingresos y las muertes y una cifra récord de niños hospitalizados, pero no parece ser tan grave en algunos infectados y en los modelos animales. A pesar de ello, las personas que no estén vacunadas o con factores de riesgo seguirán corriendo el riesgo de enfermar gravemente y morir.

Las variantes que aparezcan en el futuro seguramente modificarán su estructura de otra manera y adquirirán otras capacidades. Barclay afirma que «no soy partidaria de que nos durmamos en los laureles y creamos que todo acabó». El contagio no ha cesado y el virus sigue evolucionando en numerosas poblaciones de todo el mundo, así que reaparecerá con nuevas vías de transmisión que no hemos siquiera imaginado.

Megan Scudellari es periodista científica afincada en Boston y especializada en las ciencias de la vida.



EN NUESTRO ARCHIVO

Los principales tratamientos con anticuerpos monoclonales se muestran ineficaces contra la variante ómicron. Max Kozlov en *www.investigacionyciencia.es*, enero de 2022.
El débil ataque de la variante ómicron a los pulmones podría hacerla menos peligrosa. Max Kozlov en *www.investigacionyciencia.es*, 10 de enero de 2022
El saldo de la COVID-19 en cifras. Amanda Montáñez y otros en *IyC*, abril de 2022.

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA
DIRECTORA EDITORIAL
Laia Torres Casas
EDICIONES
Anna Ferran Cabeza, Javier Grande Bardanca, Yvonne Buchholz

EDITA
Prensa Científica, S. A.
Valencia, 307, 3.º 2.ª
08009 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344
precisa@investigacionyciencia.es
www.investigacionyciencia.es

PRODUCCIÓN
InboundCycle
Plaza Francesc Macià, 8-9, 7B
08029 Barcelona (España)
Teléfono 936 116 054

PUBLICIDAD
Prensa Científica, S. A.
Teléfono 934 143 344
publicidad@investigacionyciencia.es

COLABORADORES DE ESTE NÚMERO
ASESORAMIENTO, TRADUCCIÓN Y EDICIÓN:
Andrés Martínez: *Apuntes, El piojo de la abeja, Neandertales como nosotros (ed.)* y *La naturaleza evasiva de ómicron (ed.)*; **José Óscar Hernández Sendín:** *El vals cuántico de las aves migratorias*; **Gonzalo Claros:** *La naturaleza evasiva de ómicron (trad.)*; **Xavier Roqué:** *Retratos de la naturaleza peregrina*; **Fabio Teixidó:** *Colonialismo en la paleontología* y *Los océanos se asfixian*; **Lorenzo Gallego:** *La nueva arqueología de Jerusalén*; **Pedro Pacheco:** *La restauración de los arroyos urbanos* y *Neandertales como nosotros (trad.)*; **J. Vilardell:** *El efecto fotoacústico, o cómo escuchar la luz.*

SCIENTIFIC AMERICAN
EDITOR IN CHIEF
Laura Helmuth
PRESIDENT
Kimberly Lau
EXECUTIVE VICE PRESIDENT
Michael Florek

ATENCIÓN AL CLIENTE
Teléfono 935 952 368
contacto@investigacionyciencia.es

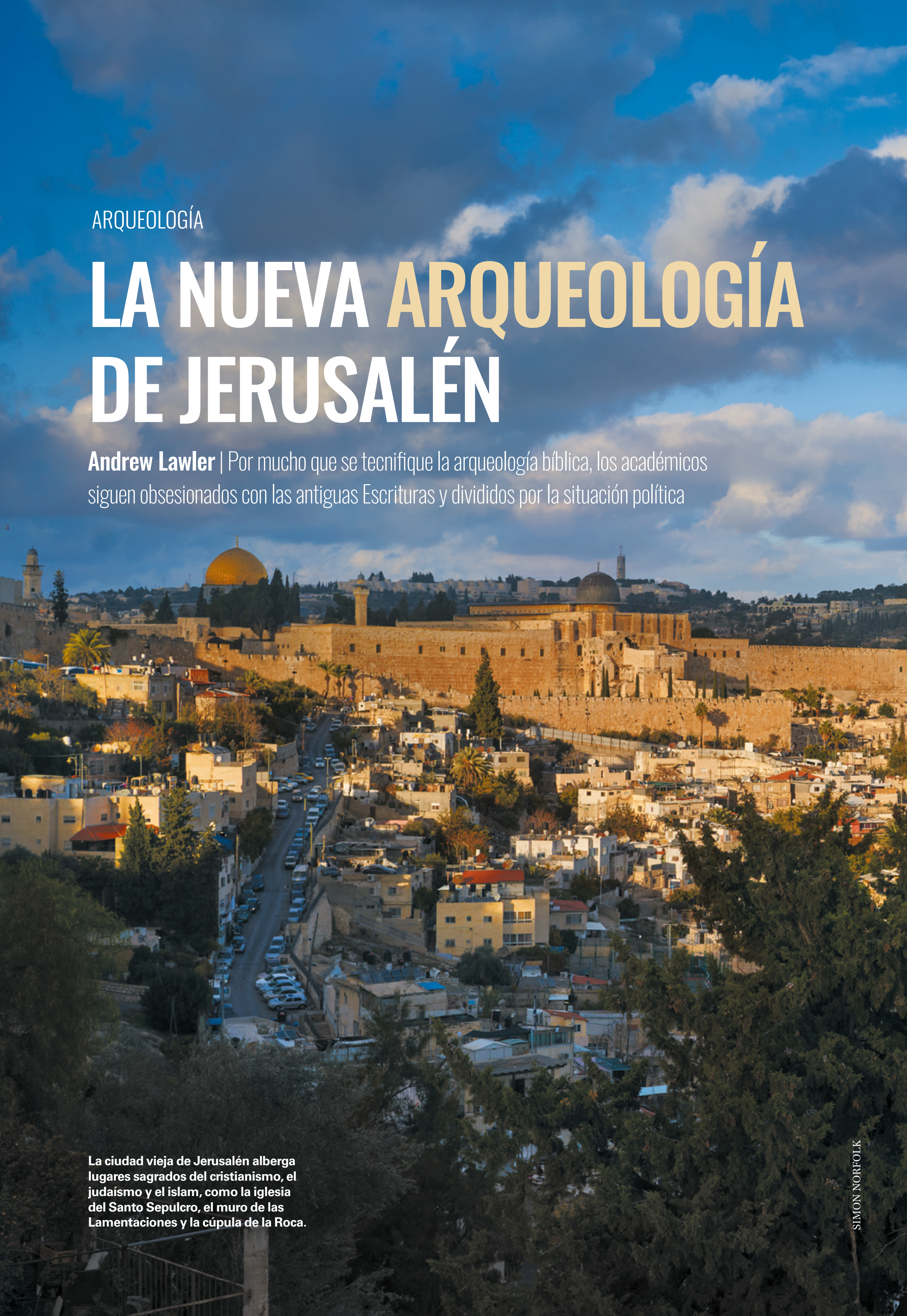
Precios de suscripción:
1 año 75€ / 2 años 140€
La suscripción incluye el acceso completo a la hemeroteca digital (todos los números publicados desde 1976).
Ejemplares sueltos: 6,50 euros

Dep. legal: B-38.999-76
ISSN edición electrónica 2385-5665

ARQUEOLOGÍA

LA NUEVA ARQUEOLOGÍA DE JERUSALÉN

Andrew Lawler | Por mucho que se tecnifique la arqueología bíblica, los académicos siguen obsesionados con las antiguas Escrituras y divididos por la situación política



La ciudad vieja de Jerusalén alberga lugares sagrados del cristianismo, el judaísmo y el islam, como la iglesia del Santo Sepulcro, el muro de las Lamentaciones y la cúpula de la Roca.

SIMON NORFOLK

El pasado otoño, los titulares de medio mundo se hicieron eco del descubrimiento de una letrina de hace 2700 años. Su importancia no tenía tanto que ver con los sistemas de saneamiento de antaño como con su ubicación: Jerusalén. Ningún otro emplazamiento ha sido objeto de tantas excavaciones como esta antigua ciudad de Oriente Medio, convertida hoy en una metrópolis en rápida expansión; en cualquier momento dado puede haber en marcha más de una docena de proyectos. Y ningún otro lugar concita tanta atención mediática por sus hallazgos arqueológicos, por mundanos que sean. Solo allí puede ocurrir que un retrete milenario acapare el interés de millones de personas.

Desde la década de 1830 han acudido en tropel buscadores de tesoros, fervientes devotos y estudiosos para escarbar en el pasado de un lugar que miles de millones de personas consideran sagrado. Ávidos de sepulturas y riquezas, los primeros en llegar fundaron la arqueología bíblica, la única disciplina basada en la idea de que la ciencia puede reforzar la fe tradicional, en vez de socavarla. Con el tiempo, los sustituyeron académicos laicos, menos preocupados por defender las Sagradas Escrituras o hallar tesoros, pero que, aun así, veían la Biblia como una herramienta igual de valiosa que sus palas.

Pero, tras más de siglo y medio de investigaciones, Jerusalén seguía desconcertando a los expertos. En su registro arqueológico de cinco mil años faltaban eras enteras, desde sus raíces judías hasta los períodos posteriores de dominio persa, helenístico y árabe. Los científicos no sabían mucho acerca de sus habitantes: qué comían, de qué enfermaban, con quiénes comerciaban o qué influencias ejercieron (y sufrieron) sobre sus vecinos.

La principal causa de esas lagunas era la añeja fijación de los arqueólogos con las Escrituras hebreas, que les impedía modernizar sus métodos para reconstruir el pasado. Hasta hace muy poco no han adoptado técnicas como la datación por radiocarbono, una práctica habitual desde hace mucho entre los investigadores que trabajan en el resto del mundo. Resueltos a encontrar restos históricos de la era bíblica, les ha costado mucho abordar la ardua tarea de hurgar en pilas de basura para comprender mejor la vida cotidiana de hace milenios.

Ahora, los expertos en Jerusalén se afanan por ponerse al día, adoptando nuevos objetivos y métodos analíticos. Sin embargo, la arqueología del siglo xxi en una ciudad compartida por tres religiones y disputada por dos pueblos sigue tan ligada a la fe y la política como lo estaba en el xix, una situación que empaña la labor científica. En Jerusalén, las excavaciones están bajo el férreo control de la Autoridad de Antigüedades de Israel, un órgano estatal que jamás concede permisos a equipos palestinos y casi nunca a extranjeros. Movidos por fines claramente religiosos, ciertos grupos fundamentalistas cristianos y judíos gastan dinero a espuertas en costosas excavaciones. Por su parte, los dirigentes israelíes son muy dados a citar los hallazgos arqueológicos para legitimar su reclamación de la Ciudad Santa, mientras que un sinfín de organizaciones internacionales denuncian cualquier excavación emprendida en las áreas ocupadas, por impecable que sea su procedimiento científico.

«La verdad brotará de la tierra», dice la parte de la Biblia que los cristianos y judíos llaman *Libro de los salmos*, y los musulmanes, *Zabur*. Pero la verdad que emerge del pasado de esta ciudad, revelada por las últimas técnicas analíticas, se ve tan complicada por la cruda realidad del presente como cuando se hincaron las primeras palas. Por eso es especialmente difícil hacer arqueología en Jerusalén. Se trata de un crisol singular donde confluyen la religión, la política y la ciencia, unas veces para cooperar y otras para estorbarse.

En síntesis

La arqueología bíblica ha impulsado las excavaciones en Jerusalén desde hace siglo y medio, pero la obsesión con las Escrituras también ha generado grandes lagunas en el registro arqueológico de la metrópoli.

En los últimos años, los expertos en Jerusalén han comenzado a arrojar luz sobre esos períodos menos conocidos, gracias a la adopción de técnicas más modernas y a la internacionalización de los proyectos.

Sin embargo, las excavaciones de la Ciudad Santa siguen muy ligadas a la fe y la política, lo cual dificulta la labor científica y podría hacer que volviera a imponerse la arqueología bíblica tradicional.

El origen de la arqueología bíblica

El estadounidense Edward Robinson, distinguido estudioso de la Antigüedad clásica, fue quien inició la «fiebre del oro» bíblica en la década de



SIMON NORFOLK

La piscina del Gorrión, una cisterna al aire libre construida en el siglo I a.C., fue cubierta durante el mandato del emperador Adriano y ahora se encuentra bajo un convento de monjas.

1830, en los albores de la arqueología moderna. Robinson era un protestante devoto que creía en la infalibilidad de la Biblia. Durante un período sabático en Alemania, se topó con la nueva moda de la crítica bíblica, que buscaba aplicar la lógica y la razón a las Escrituras. Escandalizado por lo que consideraba un cuestionamiento herético de la verdad revelada, se propuso contrarrestar esta creciente ola de escepticismo religioso y laicismo en Occidente. Y decidió que lo haría empleando métodos científicos para probar que la Biblia describía fielmente personas, lugares y hechos reales. Armado con el sagrado texto como guía de campo y con un termómetro, una cinta métrica, un telescopio y tres brújulas por todo utillaje, partió a Jerusalén en busca de lo que llamaba «los vestigios irrefutables de la Antigüedad judaica».

Lo primero que hizo Robinson fue intentar relacionar los topónimos modernos de pueblos, pozos y arroyos cercanos a Jerusalén con los textos bíblicos, a fin de demostrar la precisión geográfica de las Escrituras. Tal comunión de datos empíricos y fe resultó irresistible para los cristianos occidentales. En 1841 publicó, junto a su colaborador Eli Smith, su magna obra *Biblical researches in Palestine, Mount Sinai and Arabia Petraea* («Investigaciones bíblicas en Palestina, el monte Sinaí y Arabia Pétrea»), que se convirtió en un inesperado éxito a ambos lados del Atlántico. El libro sentó las bases de «un proyecto académico, religioso y político completamente nuevo en Tierra Santa», según el historiador Neil Asher Silberman.

Ese proyecto estaba llamado a transformar Oriente Medio. En 1863, el sultán otomano, que controlaba Jerusalén y la región circundante de Palestina, concedió a un explorador y senador francés el primer permiso para realizar excavaciones en la ciudad. Al sultán no le interesaban ni la Biblia ni la ciencia, pero deseaba mantener buenas relaciones con el poderoso confidente del senador, el emperador Napoleón III. Pronto obtuvieron sus permisos varios equipos británicos, alemanes y rusos, que comenzaron a medir, excavar y analizar antiguos enclaves de toda Palestina. Sus motivos no eran solo piadosos: el imperio otomano comprendía un vasto territorio desde Europa oriental hasta el Cuerno de África, y las potencias europeas competían por influir en él y dominarlo. Con sus importantes templos cristianos, Jerusalén ofrecía un

acceso fácil a los europeos ávidos de obtener información estratégica y expandir su influjo por el imperio. Así, los eruditos llegaron acompañados de diplomáticos, militares y espías, muchos de los cuales ansiaban encontrar riquezas, además de desenterrar el pasado.

Aunque Jerusalén cuenta con más de cinco mil años de historia, los occidentales se volcaron en lo que podríamos llamar su «milenio bíblico», entre la llegada de los hebreos después del año 1000 a.C. y la destrucción romana de 70 d.C., un período en el que se enmarca gran parte de lo que narran el Antiguo y el Nuevo Testamento. Les interesaban especialmente los primeros siglos de control judío. Aquellos exploradores, en su inmensa mayoría protestantes, habían crecido oyendo hablar del palacio del rey David y el templo de Salomón, así como de algunos objetos valiosos y sagrados vinculados al judaísmo. Entre estos tesoros figuraba el Arca de la Alianza, un cofre mágico bañado en oro que supuestamente contenía las Tablas de la Ley, bajadas por Moisés del monte Sinaí. En Jerusalén, resultaba difícil desligar las ansias de riqueza de los anhelos de conocimiento y santidad.

Desde el comienzo, las excavaciones plantearon una serie de dificultades únicas. A diferencia de lo que ocurre en muchos otros yacimientos de Oriente Medio, los restos arqueológicos de Jerusalén no están dispuestos en capas, con los más antiguos bajo los más recientes. Sus edificios se construyeron con la misma piedra caliza sobre la que se levantó la ciudad, un material rocoso formado bajo un mar extenso y somero que cubrió la región durante la era de los dinosaurios. La caliza de Jerusalén es ideal para la construcción, ya que es relativamente blanda en el momento de extraerla, pero luego se endurece y adquiere un tono dorado al quedar expuesta. Sin embargo, eso complica las cosas a los arqueólogos, ya que una piedra tallada para un antiguo asentamiento judío podría haber sido reciclada por los romanos para un templo, recogida por los árabes para terminar un arco y robada por los cruzados para levantar una iglesia. Como apenas se usaron maderas u otros materiales orgánicos, los métodos modernos de datación, como la dendrocronología y el radiocarbono, sirven de poco a la hora de determinar cuándo se alzó un edificio o quién lo erigió.

La naturaleza inestable del terreno también es una fuente de problemas. Dado que la caliza se desmenuza con facilidad, los paisajes calcáreos albergan cuevas y corrientes subterráneas. Además, tras miles de años de abrir canteras y sucesivas destrucciones, Jerusalén está sembrada de esquirlas. Lo que parece roca sólida no es sino un sedimento pedregoso que puede licuarse en un instante. Un excavador británico de la década de 1860 se lamentaba de que esos sedimentos «irrumpían de repente como el agua, sepultando nuestras herramientas y a veces también, en parte, a nuestros hombres». Y los arqueólogos siguen quejándose. En 2018, por ejemplo, se produjo un derrumbe en una excavación y se vinieron abajo toneladas de detritos rocosos.

La arqueología del siglo XXI en una ciudad compartida por tres religiones y disputada por dos pueblos sigue tan ligada a la fe y la política como en el siglo XIX

Y luego están las amenazas que vienen «de arriba». Al contrario que otros lugares como Babilonia, en el actual Irak, Jerusalén es una ciudad rebosante de vida, cuyos templos atraen la peregrinación constante de judíos, cristianos y musulmanes. El mero hecho de abrir una zanja puede verse como una afrenta o incluso una agresión. Cuando el senador francés emprendió la primera excavación legal de una tumba judía en 1863, hubo protestas en comunidades hebreas de todo el mundo. Años más tarde, los musulmanes creyeron que un proyecto británico pretendía hundir los muros de la acrópolis de la ciudad, un lugar que los judíos llaman «Monte del Templo», y los musulmanes, «Haram al-Sharif». (Los temores no eran del todo infundados, dado que el líder de la expedición se estaba abriendo paso a través del sustrato rocoso a base de dinamita.)

Desde entonces, las excavaciones han ido provocando manifestaciones, cruentos disturbios y





En una excavación realizada en un antiguo aparcamiento situado al sur de la ciudad vieja (*izquierda*) se han hallado vestigios de entre el siglo VI a.C. y la primera etapa musulmana, acaecida un milenio más tarde. Entre ellos figura un pendiente de oro de la época helenística que data del siglo III a.C. (*derecha*).

SIMON NORFOLK

crisis internacionales, y los investigadores se han visto perseguidos y agredidos por la turba. Hacer arqueología en Jerusalén no es apto para cardíacos.

Arqueología nacionalista

Al concluir la Primera Guerra Mundial y desintegrarse el imperio otomano, los británicos asumieron el protectorado de Palestina. Su mandato se extendió hasta 1948, cuando dejaron la región en manos de facciones árabes y judías enfrentadas. El nuevo Estado de Israel estableció su capital en Jerusalén Oeste, mientras que las fuerzas jordanas controlaban Jerusalén Este, la parte de la ciudad donde se hallan el casco antiguo y la mayoría de los templos y monumentos. Los equilibrios de poder volvieron a cambiar con la guerra de los Seis Días de 1967, cuando Israel conquistó Jerusalén Este y lo incorporó a su capital, aunque casi todos los países siguen considerando la zona como un territorio ocupado.

Por primera vez, los judíos israelíes tuvieron la oportunidad de explorar el subsuelo de la ciudad mientras remodelaban su superficie. A diferencia de Robinson y sus sucesores, casi todos ellos cristianos, esa nueva generación de arqueólogos bíblicos estaba integrada en su inmensa mayoría por agnósticos y ateos con escaso interés en demostrar la verdad de las Santas Escrituras. Pero eran nacionalistas fascinados por el pasado hebreo, y veían la Biblia como un texto fundacional de la nueva patria. Benjamin Mazar, famoso arqueólogo y presidente de la Universidad Hebrea de Jerusalén, no lo disimulaba: «La arqueología bíblica era parte del idealismo sionista», afirmó en 1984 en una entrevista para *Biblical Archaeology Review*.

Mazar y sus colaboradores encontraron lujosas villas, grandes avenidas e incluso el cruce peatonal elevado más impresionante de la Antigüedad. Todo ello databa de la época del rey Herodes y sus herederos, que gobernaron Judea como súbditos de Roma en el siglo anterior a Jesucristo y en tiempos de este. En el año 70 d.C, cuando una guerra civil interna se tornó en una rebelión contra el imperio, las legiones roma-

nas destruyeron Jerusalén. Tales hallazgos galvanizaron al público judío, al sacar a la luz los restos físicos de una época en la que Jerusalén había sido una ciudad judía famosa y próspera. «Los arqueólogos israelíes, profesionales o aficionados, no buscan solo conocimientos y objetos, también ansían reivindicar sus raíces», señaló el escritor israelí Amos Elon en 1971. Además, los descubrimientos captaron la atención de los políticos de Israel, que se aprestaron a citarlos para respaldar sus polémicas pretensiones sobre la Ciudad Santa.

Los palestinos denunciaron que dichas excavaciones tergiversaban los datos científicos con fines políticos, para favorecer el pasado judío de la ciudad en detrimento de su legado cananeo y cristiano-musulmán. «Nos metieron en el congelador durante 2000 años», ironiza Nazmi al-Jubeh, arqueólogo palestino de la Universidad de Birzeit, aludiendo al desinterés por los dos milenios que siguieron a la destrucción romana. Hubo excepciones notables, como cuando el arqueólogo israelí Meir Ben-Dov desenterró media docena de enormes palacios construidos en el siglo VII, poco después de la llegada de los árabes, y una importante iglesia bizantina que se creía perdida. Aun así, es indiscutible que los trabajos israelíes acometidos en el decenio posterior a la guerra de los Seis Días —y la cobertura mediática de los hallazgos resultantes— estaban muy escorados hacia el pasado hebreo.

Entretanto, los arqueólogos europeos y norteamericanos adoptaban nuevos métodos de investigación y avances técnicos. Menos centrados en los grandes monumentos, los objetos de valor museístico o el rastro de monarcas legendarios, a esos investigadores les interesaba saber cómo vivía la gente común, qué rutas comerciales conectaban a distintos pueblos y qué revelaba la cultura material sobre los cambios sociales. Las nuevas técnicas mejoraron mucho la precisión de las dataciones y, al tamizar cuidadosamente la tierra excavada, lograron arrojar luz sobre aspectos como la alimentación, las enfermedades, el comercio y los rituales.

En cambio, los investigadores de Jerusalén se quedaron anclados en sus métodos. Anhelaban encontrar la ciudad que (según el relato bíblico) conquistó el rey David y glorificó su hijo, el rey Salomón, después del año 1000 a.C. La búsqueda de esos restos, que seguían sin aparecer tras más de un siglo de excavaciones, era más importante que las cuestiones alimentarias o epidemiológicas. Además, esos arqueólogos veían con suspicacia las técnicas que ya se estaban usando en todo el mundo. Por ejemplo, desecharon sin contemplaciones la datación por carbono 14, arguyendo que su margen de error permitía atribuirle a un objeto la antigüedad que uno quisiera.

La cuestión alcanzó su punto álgido en la década de 1990, cuando Israel Finkelstein, arqueólogo de la Universidad de Tel Aviv, arremetió contra las hipótesis académicas y bíblicas sobre la edad de diversos yacimientos del país, incluida la ciudad de Jerusalén. Después de analizar una serie de cerámicas, llegó a la conclusión de que el «reloj» arqueológico que venía usándose para fechar esos materiales tenía un desfase de más de un siglo; es decir, que los edificios datados del año 950 a.C. en realidad se habrían construido en 850 a.C. Puede parecer una nimiedad académica, pero las implicaciones eran enormes. Como escribió el propio Finkelstein, eso venía a «modificar toda nuestra comprensión de la historia de Israel».

La consecuencia más drástica era que Jerusalén no había sido nunca el fastuoso epicentro de un breve imperio dirigido por el acaudalado rey Salomón, tal como detalla la Biblia. Aunque David y su famoso hijo quizá sí fueron personajes históricos, Finkelstein y un creciente grupo de eruditos creían que, más bien, habrían sido los caciques tribales de una población situada en lo alto de una colina.

Esa idea enfureció a los más tradicionalistas, incluida la nieta de Mazar, la difunta Eilat Mazar. Esta se propuso desmentir lo que consideraba una herejía, como había hecho Robinson en la década de 1830. En 2005, excavando un promontorio en la parte sur de la acrópolis, Mazar descubrió lo que, según ella, era el palacio del rey David. Sin embargo, Finkelstein y otros autores adujeron que la datación era errónea y que la estructura la habrían levantado los cananeos (una mezcla de grupos étnicos que habitaron el Levante hace tres mil años), mucho antes de la fecha en que teóricamente vivió David.

Transformación técnica

La interpretación de Mazar convenció a muy pocos, pero la disputa consiguió alterar de forma radical los métodos de trabajo de los arqueólogos de Jerusalén, que dejaron atrás la exégesis de pasajes bíblicos para pasar a discutir sobre datos científicos. Comenzaron a tamizar hasta



En el Parque Nacional de la Ciudad de David, los turistas se deleitan con un espectáculo nocturno de luz y sonido que resalta los contornos de estas vetustas piedras hebraicas. El centro está gestionado por una entidad judía de derechas, en un barrio de mayoría árabe.

SIMON NORFOLK

el último cubo de tierra, contando meticulosamente cada espina de pescado, analizando las semillas y buscando sellos administrativos que pudieran dar pistas sobre la actividad gubernativa y mercantil. En la Universidad de Tel Aviv, Finkelstein logró que instalaran el equipamiento necesario para llevar a cabo diversos análisis arqueológicos, desde determinar la naturaleza de un residuo en el fondo de una taza hasta estudiar las muestras de las letrinas para saber qué enfermedades asolaban a la población.

Nada ilustra tan bien esa transformación como los trabajos que se están realizando en un antiguo aparcamiento, situado en la vertiente oeste del promontorio donde Mazar exhumó su edificación. «Las ciencias arqueológicas son un instrumento importante que aquí, en Jerusalén, estaba totalmente infrautilizado», asegura Yuval Gadot, investigador de la Universidad de Tel Aviv que dirige esta excavación junto con Yiftah Shalev, de la Autoridad de Antigüedades de Israel. Ambos llevan desde 2017 ahondando este socavón del tamaño de una manzana urbana, el cual contiene una inusual muestra de Jerusalén que abarca desde el siglo VI a.C. hasta los primeros siglos de la dominación árabe, mil años más tarde.

En un caso, emplearon una técnica novedosa que analiza los cambios en el campo geomagnético de la Tierra para determinar la intensidad y la velocidad con que tuvo lugar la destrucción de algunas estructuras del yacimiento. Así, demostraron que la combustión y colapso de un imponente edificio administrativo del siglo VI a.C. se produjo de forma repentina, y no como resultado de pequeños incendios y de la degradación. Este drámatico suceso es claramente compatible con la destrucción de la ciudad judía por parte de los babilonios en el año 586 a.C., descrita con todo detalle en la Biblia.

No obstante, hasta hace poco, lo acaecido en Jerusalén en los siguientes cuatro siglos se conocía casi en exclusiva a través de los textos sagrados, puesto que los arqueólogos no habían

hallado más que algunos fragmentos de cerámica de esa época. Dicho período se extiende desde el dominio de los persas —que conquistaron a los babilonios— hasta los sucesores helenísticos de Alejandro Magno, que, a su vez, se adueñaron del imperio persa.

Gracias a los métodos arqueológicos modernos, el equipo del aparcamiento ha arrojado luz sobre este período tan poco conocido. El cribado meticuloso de los sedimentos excavados, por ejemplo, reveló la presencia de unos huesecillos de murciélago entre las ruinas del edificio destruido, lo que muestra que permaneció abandonado un tiempo antes de que volvieran a ocuparlo. Los investigadores también descubrieron que los judíos importaban pescado del Nilo, tanto antes como después de la calamidad de 586 a.C. Más tarde, esas importaciones disminuyeron, probablemente porque las guerras que libraron los reinos helenísticos tras la muerte de Alejando Magno, en el siglo IV a.C., alteraron las rutas comerciales.

La arqueología bíblica nunca había ofrecido tal grado de detalle. «Con un buen control de la estratigrafía, podemos abordar cuestiones como los hábitos alimentarios», explica Gadot. «Ahora somos capaces de excavar una vivienda, analizar qué comían los moradores y comprender su conexión con el resto del mundo.»

Los textos bíblicos pintan a los judíos de la época como un pueblo ensimismado, dedicado al culto monoteísta en su templo y que obedecía estrictos preceptos alimentarios, así como tabúes relativos a la representación de figuras humanas y de animales. Pero el análisis de los objetos del aparcamiento aporta una imagen con más matices. La madera de boj procedente de Anatolia indica que sus vínculos comerciales se extendían muy lejos. Además, parece que una vasija decorada con la cara de una deidad egipcia, que inicialmente se supuso importada por un mercader egipcio o fenicio, fue fabricada en Jerusalén o en sus inmediaciones. Eso constituye una señal de que en la ciudad también se asentaron pobladores de origen no judío, que trajeron consigo sus tradiciones.

Y los tabúes alimentarios tampoco definen tanto a los judíos como pensaban los eruditos. Un artículo publicado en junio de 2021 en *Near Eastern Archaeology* detallaba el hallazgo de un esqueleto de cerdo en lo que parece ser una vivienda judía, no lejos de la acrópolis en la que se ubicaba el templo. Los autores concluyeron

Demostrar la exactitud de la Biblia no es solo una cuestión de debate académico, sino parte de una guerra cultural más generalizada

que no solo se consumía carne de cerdo en la ciudad, sino que «en la capital de Judá se criaba ganado porcino con ese propósito». Por otro lado, aunque la excavación del aparcamiento se centra en la época bíblica, también se está estudiando una villa romana y bizantina, y se están tomando muestras de una letrina árabe del siglo VIII d.C. para determinar los parásitos que debilitiban a los habitantes.

Esta nueva arqueología más científica implica que se haga menos trabajo en las zanjas y más en los laboratorios, como los que alberga el sótano del Departamento de Arqueología de la Universidad de Tel Aviv. Los proyectos también se han internacionalizado: antes estaban en manos de judíos israelíes, pero ahora participan muchos doctorandos estadounidenses y europeos, lo que proporciona a los científicos israelíes importantes vínculos con el exterior. Los arqueólogos del páis también colaboran con el Instituto Weizmann de Ciencias, emplazado en Rehovot, en el análisis de grandes conjuntos de muestras mediante carbono 14, a fin de calibrar mejor la cronología jerosolimitana.

Sin embargo, la modernización de la arqueología de Jerusalén no ha contribuido a acabar con las polémicas que rodean a cualquier excavación en torno a la ciudad vieja. El proyecto del aparcamiento provocó la ira de los vecinos árabes, que demandaron a los responsables por poner en peligro sus viviendas (las cuales se alzan a lo largo de dos de los bordes del socavón). La propia excavación será parte de un enorme centro de visitantes, creado y gestionado por una polémica organización judía de derechas que se dedica a trasladar colonos a la zona. «El

uso de la arqueología para legitimar al Estado se ha convertido en un sello distintivo de Netanyahu», apuntaba Raphael Greenberg, de la Universidad de Tel Aviv, en referencia al dilatado mandato del ex primer ministro.

Gadot insiste en que «deberíamos explorar Jerusalén del mismo modo que Atenas y Roma». Pero a diferencia de esas dos capitales de la Antigüedad, Jerusalén continúa instalada en uno de los conflictos más difíciles —y violentos— de nuestra era. Aunque se haya impuesto la arqueología científica, la religión y la política son parte indisociable de cualquier gran excavación realizada en la ciudad, y eso apenas ha cambiado. «Por mucho que tamicemos, contabilicemos fragmentos de cerámica, critiquemos los textos y analicemos ADN antiguo, esa ecuación no se verá alterada», sentencia Greenberg.

El discurso de la ciencia

Eilat Mazar falleció en mayo del año pasado, pero la Biblia sigue ejerciendo una enorme influencia sobre las excavaciones de Jerusalén y de todo Israel. Como demuestra el reciente hallazgo del retrete, cualquier descubrimiento relacionado con el milenio bíblico acaba apareciendo en los diarios y sitios web nacionales y, a menudo, en los medios norteamericanos y europeos. Esta cobertura, a su vez, puede estimular donaciones esenciales para estos proyectos, que son complejos y costosos, sobre todo en Jerusalén. Las excavaciones de Mazar, por ejemplo, le deben mucho a un filántropo judío de Nueva York y a una universidad cristiana no homologada de Oklahoma.

Tras la muerte de Mazar, Yosef Garfinkel, de la Universidad Hebrea, ha recogido el testigo bíblico. Mazar le pidió desde su lecho de muerte que prosiguiera las excavaciones del Parque Nacional de la Ciudad de David, donde la arqueóloga encontró el supuesto palacio. Garfinkel no cree que Mazar lograra demostrar su hipótesis de manera concluyente, pero confía en encontrar las pruebas necesarias, y para ello se dispone a reabrir el proyecto en un futuro próximo.

Garfinkel acaba de completar una serie de excavaciones fuera de la ciudad que, según él, corresponden a asentamientos judíos ligeramente posteriores al año 1000 a.C. «Hemos encontrado el reino histórico de David», insiste. «Tenía ciudades fortificadas, un sistema de escritura y una administración.» Finkelstein, por su parte, no se deja impresionar y señala que los asentamientos apenas perduraron unos decenios y no revelan nada sobre el tamaño ni el estatus de Jerusalén. En los últimos años, Finkelstein había acercado posturas con sus oponentes en cuanto a la datación de algunos yacimientos, pero el trabajo de Garfinkel reaviva la vieja disputa sobre cómo era la ciudad cuando llegaron los israelitas.

La reaparición de lo que Finkelstein ve como una forma tradicional de arqueología bíblica le tiene preocupado. Quiere situar a Jerusalén en el contexto más amplio de un antiguo Oriente Medio dinámico y aparcar la obsesión respecto a la existencia real de tal o cual monarca. Pero «la ola de estudios conservadores es cada vez más fuerte», se lamenta. «No son solo Eilat Mazar y Yosef Garfinkel. Es muy deprimente; estamos perdiendo la batalla.»

Para luchar contra esta tendencia, Finkelstein acaba de poner en marcha un nuevo programa de arqueología en la Universidad de Haifa, que hará hincapié en los últimos avances científicos, la colaboración internacional y los estudios museísticos, y que cuenta con acaudalados promotores. «Pero, por supuesto», añade, «la contienda va más allá de la arqueología». Israel, al igual que Estados Unidos, es un país cada vez más polarizado, y esas divisiones se reflejan en la investigación, además de en la política. Demostrar la exactitud de la Biblia no es solo una cuestión de debate académico, sino parte de una guerra cultural más generalizada.

Los palestinos se han quedado, en gran medida, al margen. Y al-Jubeh, el arqueólogo de la Universidad de Birzeit, no cree que los responsables últimos sean los sionistas, sino los cristianos occidentales como Robinson, que estaban obcecados con el Antiguo Testamento. Como resultado, «Jerusalén es la ciudad más excavada del mundo, y los trabajos han servido para componer un relato israelí», subraya. «Pero, al final, solo hay un discurso: el discurso de la ciencia.»

En la era de la posverdad, esa idea es un consuelo. Pero no hay duda de que separar la ciencia de los conflictos que dividen esta ciudad sigue siendo una tarea de proporciones bíblicas.

Andrew Lawler es periodista científico. Escribe para *Science*, colabora con *Archaeology* como editor y es autor de *Under Jerusalem: The buried history of the world's most contested city* (Doubleday, 2021).



EN NUESTRO ARCHIVO

El secreto de Nabada. Joachim Bretschneider en *IyC*, agosto de 1999.

HISTORIA DE LA CIENCIA

RETRATOS DE LA NATURALEZA PEREGRINA

José Ramón Marcaida | Novedades visuales en un tratado de historia natural del siglo XVII

Suele decirse que una imagen vale más que mil palabras. La historia de la ciencia, sobre todo en épocas recientes, se lo ha tomado muy en serio, pues ha prestado atención a la diversidad de formas en que el conocimiento científico y la cultura visual se han relacionado y complementado a lo largo de los tiempos. La representación de animales y plantas, sobre todo en el caso de especímenes particularmente llamativos o poco conocidos, constituye uno de los temas que más interés ha generado por la dimensión visual de la ciencia. Es una cuestión cuya relevancia hoy en día ha quedado demostrada, por ejemplo, por la profusión y el éxito de publicaciones, exposiciones y documentales dedicados a la historia natural y sus imágenes.

Ahora bien, en otras épocas, el interés por captar y plasmar visualmente los aspectos más vistosos y novedosos del mundo natural no fue menos acentuado. El caso que aquí presentamos pertenece a un tiempo y a un contexto caracterizados por un dinamismo extraordinario tanto en lo que concierne al desarrollo de los saberes científicos y técnicos como al cultivo de las artes plásticas y otras expresiones de la cultura visual. Me estoy refiriendo a las primeras décadas del siglo XVII en Europa, un momento histórico marcado igualmente por fenómenos como la expansión y progresiva consolidación de los proyectos coloniales europeos, o la circulación y tráfico de ideas, objetos y personas a escala global.

Escrito por el jesuita español Juan Eusebio Nieremberg (1595-1658), *Historia naturae, maxime peregrinae* (1635) pertenece al catálogo de nuevas publicaciones sobre temas de historia y filosofía natural que fueron apareciendo a lo largo del siglo XVII. Redactado en latín, el libro fue impreso en Amberes, en la prestigiosa casa editorial fundada por Christophe Plantin. Nieremberg fue un intelectual muy reconocido en la España del Seiscientos. Entre otros cargos, ocupó la cátedra de historia natural en los Reales Estudios del Colegio Imperial de Madrid, aunque su fama se debe sobre todo a su labor como autor de obras de temática religiosa.



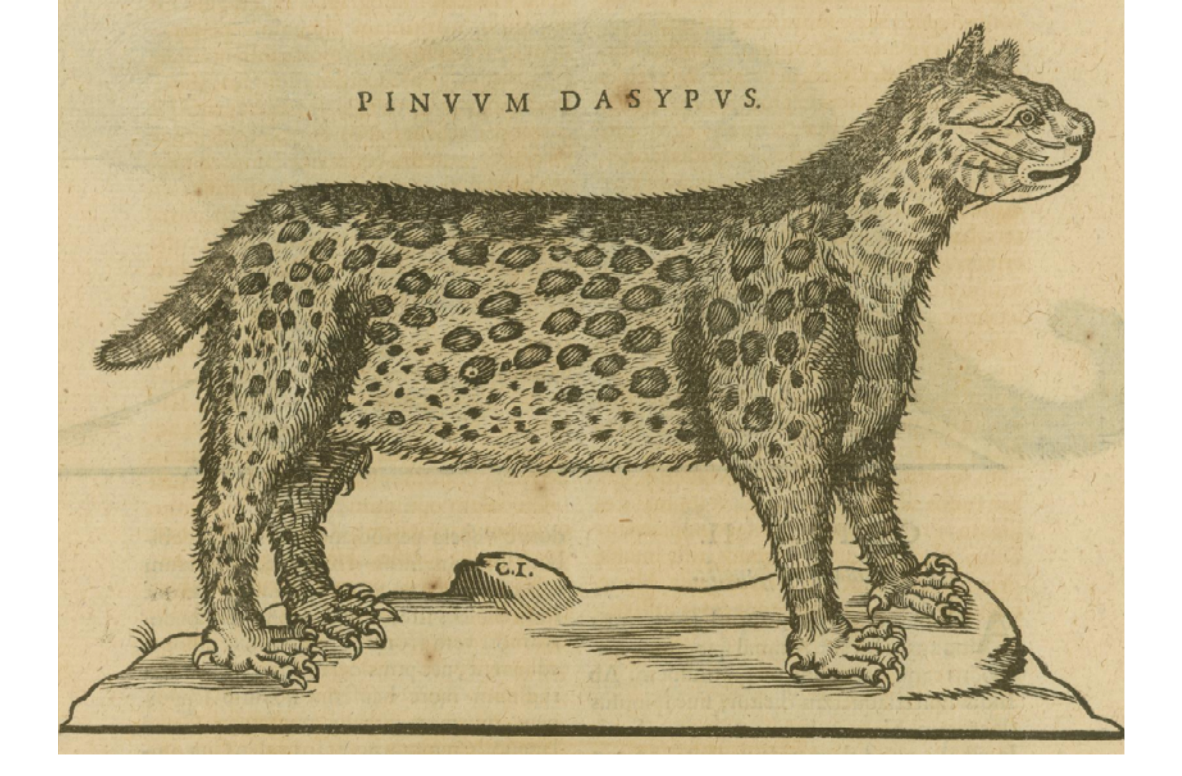
***Tlacuatzin* o zarigüeya.**

Historia naturae, la más importante de sus publicaciones sobre cuestiones de historia y filosofía natural, ofrece una exploración de las maravillas de la naturaleza peregrina o exótica (especialmente la naturaleza americana, aunque su análisis cubre otros continentes), con el fin de ponderar y celebrar la labor creadora de Dios. El tratado es conocido por el hecho de haber empleado los materiales recopilados en una de las expediciones científicas españolas más importantes del siglo anterior: la expedición a Nueva España del médico Francisco Hernández (1570-1577), quien reunió descripciones de miles de especímenes botánicos, zoológicos y geológicos de Mesoamérica desconocidos en Europa, muchas de ellas acompañadas de ilustraciones. *Historia naturae* incluye, de manera casi literal, mucho de este contenido descriptivo, que se suma a otros textos extraídos de numerosas fuentes impresas y manuscritas.

Pero en lo que me quiero detener aquí es en el componente visual del libro de Nieremberg. Comparado con otros tratados de autores como Conrad Gessner (1516–1565), Ulisse Aldrovandi (1522-1605) o Carolus Clusius (1526-1609), *Historia naturae* no es un libro profusamente ilustrado: entre sus páginas se cuentan setenta imágenes, todas ellas realizadas mediante la técnica del grabado en madera. Sin embargo, por el hecho de incorporar muchos de los materiales de la expedición de Hernández, la obra de Nieremberg ofrece algo que en el contexto de los estudios naturalistas de su época era sumamente apreciado: contenido visual inédito, en el sentido de representaciones no publicadas hasta entonces en otros tratados.

El primero de los cinco casos que he seleccionado es la imagen de una zarigüeya, un animal que acaparó un enorme interés entre los primeros exploradores del mundo natural americano, debido, entre otros motivos, a su condición de marsupial, es decir, al hecho inaudito de estar dotadas las hembras de una bolsa donde criar y transportar a las crías.

Siguiendo a Hernández y a otros autores, Nieremberg recoge la diversidad de nombres autóctonos empleados para referirse a este animal, incluida la versión en náhuatl, *tlacuatzin*,



***Ocotochtli,* una especie de lince (*Lynx rufus*).**

que es la que acompaña al grabado. La imagen, que ocupa casi la totalidad de la página (el libro es de tamaño folio), muestra a una zarigüeya hembra y a sus crías, que parecen estar a punto de salir de la bolsa. Se aprecian rasgos característicos, como el hocico puntiagudo, o la cola desprovista de pelo, cuyas propiedades curativas eran bien conocidas en la cultura médica indígena. Detalles como el modo en que está representada la textura del pelaje del animal indican que nos encontramos ante la obra de un grabador habilidoso. Se trata de Chistoffel Jegher, un importante artista flamenco vinculado a la imprenta plantiniana, famoso por su colaboración con Peter Paul Rubens en una serie de grabados en madera basados en diseños de este último. Jegher, cuyas iniciales figuran a los pies de la zarigüeya, realizó buena parte de las matrices xilográficas empleadas en *Historia naturae*, pero no todas. El libro de Nieremberg incluye también numerosas imágenes realizadas con matrices utilizadas anteriormente para ilustrar obras de Clusius y otros naturalistas. Este «reciclaje» de matrices por parte de los impresores era una práctica habitual que abarataba los costes de producción de los libros ilustrados.

En segundo lugar, tenemos la imagen del *ocotochtli*, una especie de lince (*Lynx rufus*) endémica del continente americano. El nombre en náhuatl se traduciría como «conejo de los pinos», posiblemente en referencia a la agilidad de este felino. El grabado capta de manera convincente aspectos de su apariencia externa: patrones en las manchas de la piel (incluidas las marcas en sus patas delanteras), cuerpo compacto, cola corta y hocico chato. El caso del *ocotochtli* es uno de los muchos ejemplos que emplea Nieremberg para argumentar que el mundo natural es un repositorio de lecciones morales creado por Dios para beneficio de los humanos. En este caso concreto, Nieremberg presenta al *ocotochtli* como un símbolo de la bondad y la generosidad, pues, según recogen algunas fuentes, tras matar a su presa con su lengua venenosa, este animal deja que otras criaturas se alimenten de ella primero, con el fin de librarles del peligro de su ponzoña.

En tercer lugar, tenemos la imagen del *hoitztlacuatzin* (*tlacuatzin espinoso*), un tipo de puercoespín americano, posiblemente un *Coendu mexicanus*. El grabado muestra el modo en que Jegher aprovecha los recursos de la técnica xilográfica para representar el contraste entre el color oscuro del pelo de este animal y la tonalidad más clara de las espinas. La imagen presta también atención a la diversidad de texturas: desde la zona más clareada de la cabeza o el hocico desnudo, hasta la cola, en parte desprovista de espinas.



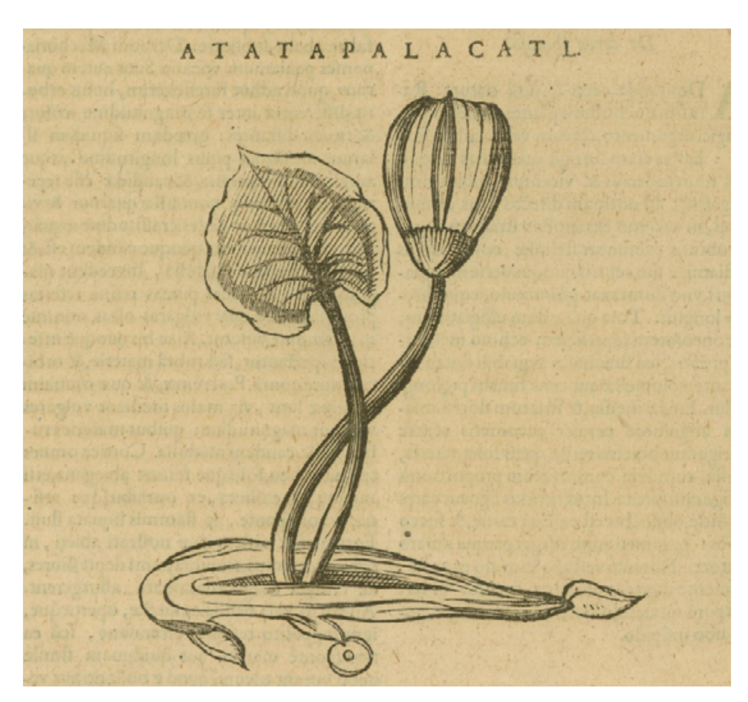
Hoitztlacuatzin, **un tipo de puercoespín americano (*Coendu mexicanus*).**

Cabe señalar que una imagen muy similar a la del puercoespín americano fue incluida unos años más tarde en el tratado *Rerum medicarum Novae Hispaniae thesaurus* (1651), la edición de los materiales de Hernández publicada por la Accademia dei Lincei (Academia de los Linces, o «los de vista de lince») en Roma. El uso probable de un mismo modelo hernandino (copias de las ilustraciones de la expedición circulaban entre España, Italia y los Países Bajos) explicaría la similitud entre ambas representaciones.

La cuarta ilustración representa a un mapache (palabra procedente del náhuatl *mapachin*). De nuevo, detalles como el pelaje del animal, incluidas las manchas y rayas, y sus diferentes tonalidades, revelan la sutileza del trabajo de Jegher. La manera de representar las garras —cuyo parecido con las manos humanas es mencionado en las fuentes escritas— parece hacer énfasis en el uso que el mapache hace de ellas para manipular cosas, y a la asociación entre el nombre náhuatl del animal y la figura del ladrón.



Mapache.



***Atatapalactl* (*Pistia stratiotes L*) o lechuga de agua**.

de estas convenciones al servicio de la transmisión y visualización del conocimiento, un detalle sin precedentes en la historia de la publicación de imágenes naturalistas en este periodo.)

El libro de Nieremberg, en definitiva, constituye un caso ciertamente singular en la historia de la cultura visual de la ciencia moderna europea. Tras sus novedades iconográficas se esconden intrincados procesos que tienen que ver con la apropiación y transmisión de información, la adopción y adaptación de convenciones visuales y la aplicación de técnicas y tecnologías de la imagen, entre otras dinámicas. Dar cuenta de la complejidad y riqueza que subyacen a este y a otros productos de la cultura científica de esta época continúa siendo un desafío fascinante.

Mi último ejemplo corresponde a la imagen de una planta, una de las quince sobre temas botánicos incluidas en *Historia naturae*. Se trata de *Pistia stratiotes*, o lechuga de agua, cuyas propiedades medicinales describe Nieremberg siguiendo la información recopilada por Hernández en Nueva España. Como mostró en su día el historiador de la ciencia Germán Somolinos D'Ardois, este grabado es una rareza: complementando la información transmitida por el nombre náhuatl (*atatapalacatl*), la imagen expresa la naturaleza acuática de esta planta al representarla emergiendo del glifo del elemento «agua» (*atl*), según la convención pictográfica adoptada por los escribas-pintores (*tlacuiloque*) del antiguo México. En el grabado se reconocen los motivos de los caracoles y las piedrecitas de jade (*chalchihuites*) que con frecuencia figuran en las representaciones de dicho glifo.

Se trata, por tanto, de una imagen que preserva aspectos del lenguaje visual que emplearon los pintores nativos al servicio de la expedición de Hernández, un lenguaje diferente al utilizado en los tratados naturalistas europeos y desconocido para el lector no experto. (*Historia naturae* contiene otros dos grabados que reflejan el uso

José Ramón Marcaida es científico titular en el Departamento de Historia de la Ciencia del Instituto de Historia del CSIC.



PARA SABER MÁS

Comentarios a la obra de Francisco Hernández. Tomo VII. Obras completas de Francisco Hernández. Germán Somolinos d'Ardois. Universidad Nacional de México, 1985.

Searching for the secrets of nature. The life and works of Dr. Francisco Hernández. Coordinado por Simon Varey, Rafael Chabrán y Dora B. Weiner. Stanford University Press, 2000.

A New World of animals. Early modern Europeans on the creatures of Iberian America. Miguel de Asúa y Roger French. Ashgate, 2005.

Arte y ciencia en el Barroco español. Historia natural, coleccionismo y cultura visual. José Ramón Marcaida. Marcial Pons Historia, 2014.

EN NUESTRO ARCHIVO

Historia y legado de Félix de Azara. José María López Piñero en *IyC*, octubre de 1981.

Ciencia y arte: Juan Bautista Bru (1740-1799). José María López Piñero en *IyC*, enero de 1985.

Hace 400 años. Efemérides relativa a Francisco Hernández. José María López Piñero en *IyC*, enero de 1987.

Descubrimiento europeo de la flora americana. José María Valderas en *IyC*, octubre de 1992.

FORO CIENTÍFICO

LOS OCÉANOS SE ASFIXIAN

Nathalie Goodkin y Julie Pullen | La concentración de oxígeno marino constituye la próxima gran víctima del cambio climático

El verano pasado, en un suceso excepcional ocurrido en la bahía de Tampa, en Florida, más de 160 kilómetros de costa quedaron convertidos en una zona muerta sin oxígeno plagada de peces sin vida. En el noroeste, los cangrejos de Dungeness (*Metacarcinus magister*) chapoteaban en las playas de Oregón, incapaces de escapar de unas aguas que, en las dos últimas décadas, han sufrido episodios estacionales drásticos de pérdidas de oxígeno.

Buena parte del debate en torno a nuestra crisis climática incide en la emisión de gases de efecto invernadero y su repercusión en el calentamiento global, las precipitaciones, la elevación del nivel del mar y la acidificación de los océanos. Sin embargo, se oye hablar poco de las consecuencias que el cambio climático acarrea en las concentraciones de oxígeno, sobre todo en los océanos y los lagos. Pero lo cierto es que, en unas aguas sin suficiente oxígeno, los organismos no pueden sobrevivir. Por eso, para los 3000 millones de personas cuyos ingresos dependen de la pesca costera, una disminución de los niveles de oxígeno marino supone una catástrofe.

Como expertas en cuestiones climáticas relacionadas con el océano y la atmósfera, consideramos que la concentración de oxígeno marino constituye la próxima gran víctima del calentamiento global. Para evitar que la situación se agrave, debemos incluir en el debate climático la peligrosa situación en que se encuentran los niveles de oxígeno oceánico (el sustento de las formas de vida de nuestro planeta). Debemos acelerar la puesta en marcha de soluciones climáticas para el océano que permitan reforzar su concentración de oxígeno. Un ejemplo son algunas de las propuestas basadas en procesos naturales que se debatieron en la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (COP26), celebrada en Glasgow en 2021.

A medida que aumenta la cantidad de dióxido de carbono en la atmósfera, no solo se calienta el aire al absorber una mayor radiación, sino también el agua. La interacción entre los océanos y la atmósfera es compleja, pero la situación puede resumirse en que los océanos han absorbido cerca del 90 por ciento del exceso de calor generado por el cambio climático a lo largo del Antropoceno. Los cuerpos de agua también pueden absorber CO_2 y oxígeno, aunque solo hasta cierto punto, puesto que el agua caliente retiene menos oxígeno. Esa disminución se suma a la pérdida a escala mundial del fitoplancton, una fuente de oxígeno cuya desaparición no solo se atribuye al cambio climático, sino también a la contaminación por plásticos y la escorrentía industrial, lo que altera los ecosistemas, asfixia la vida marina y causa una mayor muerte de organismos. Vastas regiones oceánicas ya han perdido entre el 10 y el 40 por ciento de su oxígeno, y se piensa que el cambio climático acelerará el proceso.

La drástica desoxigenación de nuestras masas de agua agrava los mecanismos de retroalimentación climáticos que han sido descritos por expertos de distintas disciplinas. Centenares de esos científicos firmaron en 2018 la Declaración de Kiel sobre la Desoxigenación de los Océanos, que ha culminado en la nueva Década Mundial del Oxígeno Oceánico, un proyecto enmarcado en la Década de los Océanos de la ONU (2021-



OCTAVIO JONES/GETTY IMAGES

Marea de peces muertos en Madeira Beach, Florida, en julio de 2021.

2030). Pero pese a haber investigado durante años el cambio climático y sus efectos en la temperatura, sabemos poco, en comparación, sobre su repercusión en la concentración de oxígeno y sobre lo que podría suponer para la totalidad del sistema terrestre una disminución del gas.

Mientras el sector financiero invierte en soluciones para mitigar el cambio climático, entre las que se incluyen propuestas basadas en geoingeniería, como la fertilización de los océanos con hierro, corremos el riesgo de agudizar la desoxigenación. Debemos analizar cualquier consecuencia imprevista que pudieran tener las soluciones climáticas en todo el sistema que sustenta la vida.

Además de hacer un mejor seguimiento del oxígeno y de establecer un sistema que lo cuantifique, el programa que planteamos incluye valorar por completo los beneficios colaterales que reporta a los ecosistemas la captura de carbono por las algas oceánicas, las praderas submarinas, los manglares y otros humedales. Las soluciones basadas en el secuestro de este carbono, denominado «azul», también pueden favorecer la oxigenación de nuestro planeta a través de la fotosíntesis. En la COP26 vimos muchas iniciativas y compromisos centrados principalmente en el dominio terrestre, como la gestión forestal, que suponen excelentes pasos adelante. Esperamos que la conferencia sobre el clima de 2021 y la COP27 de este año sirvan para que las medidas basadas en procesos naturales oceánicos se materialicen, impulsadas por la Década de los Océanos de la ONU.

Incluir el oxígeno en el debate climático nos motivaría a realizar el trabajo necesario para comprender las profundas transformaciones que están sufriendo nuestros complejos sistemas atmosféricos y oceánicos. A pesar de que, en los últimos años, hemos celebrado el regreso de las ballenas jorobadas al puerto de Nueva York y al río Hudson, ambos cada vez más limpios, también hemos visto cómo el río se llenaba de peces muertos en verano a causa de unas aguas más cálidas y con menos oxígeno. El modo en que los ecosistemas responden a los sistemas físicos y químicos puede servirnos de guía para adoptar nuevos enfoques a la hora de plantear soluciones climáticas. Estas podrían integrar los entresijos del sistema que sustenta la vida en nuestro planeta y complementar el conocimiento sobre las medidas que reducen las emisiones de CO_2. Cerca del 40 por ciento de la población mundial depende del océano para subsistir. Si no logramos proteger la vida marina de la falta de oxígeno, nos moriremos de hambre.


Nathalie Goodkin es oceanógrafa química y conservadora adjunta del Museo Americano de Historia Natural.



Julie Pullen dirige proyectos relacionados con el riesgo y las soluciones climáticas. Es investigadora adjunta en el Instituto de la Tierra de la Universidad de Columbia.





J. JONES/PROYECTO AMBER *(red fluvial europea, marcada por fuertes discontinuidades)*

LA FRAGMENTACIÓN DE LOS RÍOS

Carlos García de Leániz | Un sinfín de barreras interrumpe el flujo de los ríos europeos y altera los ecosistemas fluviales. Una iniciativa científica internacional propone medidas para reconectarlos

Los ríos albergan una de las biodiversidades más ricas de la Tierra. Pero también constituyen algunos de los ecosistemas más amenazados a causa de las actividades humanas, entre ellas la sobreexplotación de los recursos pesqueros, la contaminación de las aguas o la degradación del hábitat. Un factor principal de degradación es la construcción de barreras que impiden o limitan la libre circulación de los ríos.

A lo largo de los siglos, las presas, los azudes, las compuertas y las esclusas nos han permitido captar agua de los ríos, moler harina, operar ferrerías, generar electricidad, controlar las avenidas y transportar mercancías a través de las grandes vías fluviales. Los ríos han proporcionado servicios esenciales a la humanidad, y siguen haciéndolo, pero si algo caracteriza nuestro aprovechamiento de ellos es que, al usarlos, los hemos fragmentado.

La fragmentación pone en peligro los organismos que viven en el río o en las zonas contiguas a él, ya que modifica el flujo natural y los regímenes térmicos del agua, interrumpe la conectividad entre el río y la llanura de inundación, reduce la productividad acuática y limita el acceso de los peces a los hábitats de desove y crianza.

De ahí que la reducción de la fragmentación sea un objetivo clave de numerosos programas de restauración fluvial. De hecho, la nueva Estrategia sobre Biodiversidad para 2030 de la Unión Europea insta a los Estados miembros a reconectar al menos 25.000 kilómetros de ríos y convertirlos en ríos de flujo libre sin barreras para 2030. Pero ¿qué significa exactamente esto, y qué soluciones existen para conseguirlo?

La recuperación de la continuidad fluvial en Europa representa un reto especialmente difícil de abordar porque en muchas regiones hay un conocimiento limitado de las barreras existentes, lo que supone un obstáculo para tomar decisiones bien informadas. Para llenar esa laguna de conocimiento y ofrecer posibles soluciones correctoras, en 2016 varios centros de investigación y otras entidades emprendimos el proyecto AMBER (siglas inglesas de «Gestión Adaptativa de las Barreras en los Ríos Europeos»). La iniciativa persigue crear un inventario de todas las barreras existentes en los ríos europeos y proponer medidas de gestión de dichas barreras con vistas a la restauración fluvial.

En síntesis

A lo largo de la historia, la construcción de infraestructuras en los ríos para distintos aprovechamientos ha fragmentado los cursos fluviales y alterado sus ecosistemas.

La fragmentación es especialmente acusada en los ríos europeos, donde la densidad de barreras transversales, en su mayoría de pequeño tamaño, es la mayor del mundo.

Para reconectar los ríos y aumentar su salud ecológica es preciso conocer el número, el tamaño y la ubicación de las barreras, así como el impacto que ejercen en cada caso. Y también debe considerarse el balance entre los beneficios y los costes que suponen desmantelarlas.

Los trabajos derivados del proyecto han revelado que la mayor parte de los ríos europeos están mucho más fragmentados de lo que se pensaba y son probablemente los más fragmentados del mundo. Pero ¿qué impactos ecológicos tienen las barreras? ¿Cuáles son las mejores estrategias para lograr un aprovechamiento rentable de ellas y a la vez recuperar los ecosistemas fluviales?

Los ríos sanos fluyen

En 1980, Robin L. Vannote, director del Centro Stroud de Investigación de Aguas, en Pensilvania, propuso el concepto de «continuo fluvial» y estableció las bases para entender los ríos como sistemas en equilibrio dinámico que fluyen y cambian gradualmente desde la cabecera hasta la desembocadura según unas pautas bien definidas. En la cabecera, donde predominan las pendientes altas, la corriente es rápida, el cauce es estrecho, con un sustrato grueso, y la vegetación de ribera forma bosques en galería que reducen la cantidad de luz que llega al agua. La mayor parte de la materia orgánica que contiene es exógena (procede de la vegetación terrestre de alrededor). Los macroinvertebrados acuáticos están dominados por especies fragmentadoras que se alimentan de las hojas que caen de los árboles. Las escasas especies de peces que medran allí están adaptadas a vivir en zonas de alta velocidad de la corriente. En cambio, en el tramo bajo, el caudal es mayor, la profundidad y el aporte de sedimentos aumentan, y la mayor parte de la materia orgánica es endógena (procede del mismo río). El ecosistema fluvial se torna complejo, con más especies e interacciones entre ellas, y

numerosas especies se vuelven más abundantes (cuentan con muchos individuos).

En otras palabras, lo que caracteriza a un río es que fluye y cambia de forma gradual, sin discontinuidades abruptas. Tales cambios son predecibles, de modo que la calidad del río depende en gran medida de la calidad de su cuenca y de sus cabeceras. Si bien esto puede parecer hoy obvio, no siempre fue así. Décadas atrás, muchos investigadores se pasaban la vida estudiando «su metro cuadrado de agua», se quejaba Vannote, como si los ríos no fluyesen.

Aunque el concepto de continuo fluvial se ha ido enriqueciendo y matizando con el paso del tiempo, su parte esencial sigue siendo válida y representa un marco de referencia útil para detectar y predecir los efectos de las alteraciones antrópicas, incluida la fragmentación causada por las barreras artificiales.

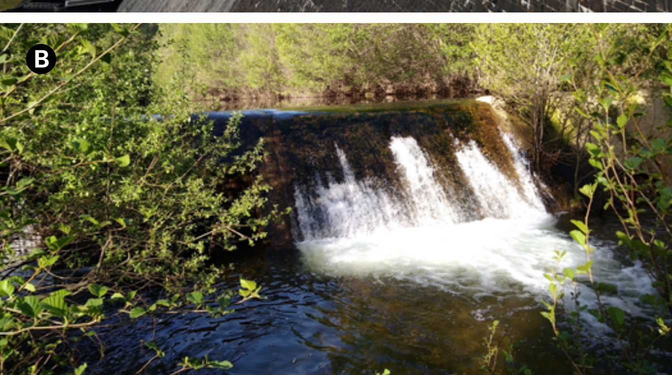
¿Qué es la fragmentación fluvial?

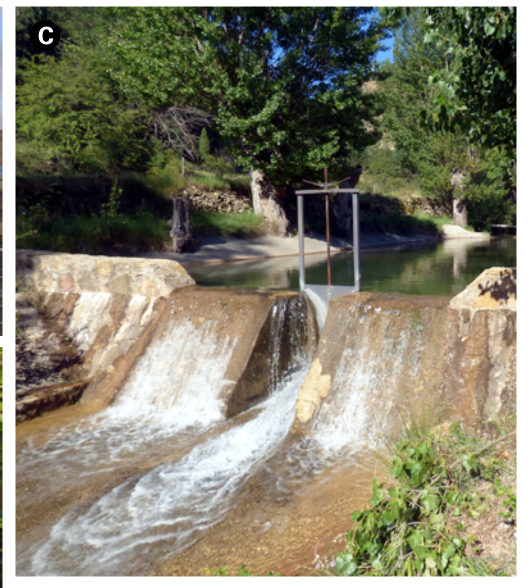
Esta se entiende como la pérdida de conectividad causada por la introducción de barreras artificiales. La geóloga Ellen Wohl, de la Universidad Estatal de Colorado, ha distinguido tres tipos de conectividad fluvial: la longitudinal, que hace referencia a la continuidad en el sentido de la corriente del río (desde el nacimiento hasta la desembocadura); la lateral, la que se crea entre el cauce y la llanura de inundación; y la vertical, que atañe a la continuidad entre el cauce y el acuífero subterráneo. Las tres formas de conectividad, junto con los cambios asociados al paso del tiempo, conforman las cuatro dimensiones fluviales.

Tradicionalmente, la conectividad longitudinal ha sido la más estudiada, lo que explica que el efecto de las barreras transversales, como presas y azudes, sea el más conocido. En este artículo me centraré sobre todo en ellas. Sin embargo, no son ni mucho menos las únicas barreras importantes. Existen otras, como diques, escolleras y motas, que no interrumpen la corriente, pero impiden o reducen la conectividad lateral y la vertical.

Definir el término *barrera transversal* no resulta fácil. En el proyecto europeo AMBER nos hemos referido a ella como «cualquier estructura artificial que interrumpe o modifica el flujo del agua, el transporte de sedimentos o el movimiento de los organismos, y que puede causar una discontinuidad longitudinal». Esta definición supone un cambio de énfasis e invita a considerar no solo el impacto en el movimiento de los organismos (que varía según la especie o el taxón), sino en todos los procesos fluviales, como el flujo de sedimentos, con especial hincapié en la cuantificación de la discontinuidad.







ENTRE LAS BARRERAS que represan agua figuran las presas, como la del río Claerwen, en Gales (*A*); los azudes, como el ilustrado del río Robledillo, en Castilla-La Mancha (*B*), y las compuertas, como la del río Villahermosa, que discurre entre Aragón y la Comunidad Valenciana (*C*).

S. BARRENTO (*presa*); AEMS-RÍOS CON VIDA (*azud y compuerta*)

La definición excluye las barreras que no son estructuras hidráulicas, como una masa de agua demasiado caliente o demasiado fría, una velocidad de la corriente excesiva, un caudal insuficiente o un tramo de aguas contaminadas. Todas pueden impedir o dificultar el movimiento de los peces y otros organismos acuáticos y constituyen barreras artificiales, pero no son estructuras hidráulicas. También excluye las barreras como los saltos de agua naturales, ya que, si bien limitan la colonización de algunas especies migradoras, a diferencia de las barreras artificiales, no interrumpen el continuo fluvial. No alteran la morfología del río, ni causan un represamiento, ni afectan al flujo de sedimentos.

Las barreras transversales se clasifican en seis tipos principales atendiendo a su uso, tamaño e impactos. Las de mayor altura almacenan agua y regulan el caudal y, debido a su efecto de embalse, modifican el hábitat fluvial. Entre ellas se incluyen las presas, los azudes y las barreras de compuertas o esclusas. Las presas suelen ser más altas (más de cinco metros) que los azudes. En estos el agua fluye normalmente por encima de la coronación, a diferencia de las presas (aunque muchas tienen también aliviaderos) y su función consiste en desviar el agua, por ejemplo, para el riego o, antiguamente, para molinos o ferrerías; puesto que su capacidad de represar agua es pequeña, no suelen servir para generar energía hidroeléctrica, aunque hay excepciones. Las barreras de compuertas se caracterizan por que pueden abrirse por completo, como las esclusas de los canales, algo que no es posible ni en los azudes ni en las presas (si bien estas puedan disponer de aliviaderos y compuertas de fondo).

Estos tres tipos de barreras que represan agua son los que más alteran los ríos de forma individual. Sin embargo, como suelen ser las menos abundantes, su impacto acumulado es mucho menor que el ocasionado por las barreras más pequeñas pero mucho más numerosas.

Estas últimas no embalsan ni derivan el agua y se construyen con diversas finalidades. Mientras que las rampas sirven para estabilizar los cauces y reducir la incisión en las márgenes de los ríos canalizados o modificados, los vados y los entubados (o tuberías) permiten cruzar los pequeños cursos fluviales de manera más económica que construyendo puentes. Aunque no ocasionen ninguna diferencia apreciable de cota ni causen ningún represamiento, la velocidad de la corriente en las tuberías suele ser demasiado alta, la profundidad demasiado escasa, o la salida del agua puede quedar







LAS BARRERAS TRANSVERSALES PEQUEÑAS (que no represan agua) son las más numerosas en todos los ríos europeos. Consisten en rampas de estabilización a base de piedras, como la del río Töss, en Suiza (*A*); vados, como el del río Guadalhorce (*B*); o los entubados, como el del río Afan, en Gales (*C*).

BOSIGER (*rampa*); AEMS-RÍOS CON VIDA (*vado*); J. JONES (*entubado*)

«colgada» en el aire, de tal manera que resultan infranqueables por los organismos, tanto o más que otras barreras.

Impactos ecológicos de las barreras

Si bien el efecto más evidente de las barreras es impedir o dificultar el movimiento de los organismos acuáticos, este no es ni mucho menos el único impacto. Las barreras alteran también numerosos procesos hidrogeomorfológicos: muchas presas interrumpen el transporte de sedimentos y cambian el régimen hidrológico, así como la temperatura del río, tanto aguas arriba como aguas abajo. El agua que sueltan las presas suele ser muy pobre en sedimentos (que han quedado atrapados en el embalse), lo que aumenta su energía y poder erosivo y, como consecuencia, favorece la incisión de las márgenes y del lecho fluvial. Además, aguas abajo, los humedales de los ríos regulados por presas corren un mayor riesgo de quedarse secos, y la interrupción del aporte estacional de sedimentos repercute también en los estuarios y en los ecosistemas costeros.

Incluso las barreras muy pequeñas frenan el movimiento de las especies con menor capacidad natatoria, como el piscardo, el cavilat o el lobo de río

Pero ¿a partir de qué tamaño una estructura constituye una barrera? Aunque pueda parecer que el impacto de esta depende de su altura, no siempre es así. Tradicionalmente, el impacto se evaluaba atendiendo casi solo a su franqueabilidad (transitabilidad o permeabilidad) para los peces, sobre todo para los salmónidos. Se consideraba que las estructuras de menos de 50 centímetros de altura no ofrecían ninguna dificultad de franqueo y, por lo tanto, no suponían ningún obstáculo. Pero se trata de una visión muy sesgada, ya que la capacidad natatoria de los salmónidos, auténticos «medallistas olímpicos» de la natación y del salto de altura, no es en absoluto representativa de todos los peces de agua dulce.

En nuestros experimentos de laboratorio hemos empleado tanques de agua con cascadas artificiales y túneles de natación para observar el efecto de la altura de las barreras en los organismos. Nuestros resultados han demostrado que incluso las barreras muy pequeñas, correspondientes a cascadas de menos de 10 centímetros, frenan el movimiento de los peces con menor capacidad natatoria, como el piscardo (*Phoxinus phoxinus*), el cavilat (*Cottus gobio*) o el lobo de río (*Barbatula barbatula*). Además, puesto que las especies y los individuos varían en su habilidad para franquear los obstáculos, las barreras artificiales (y también los pasos para peces) pueden generar una fuerte presión selectiva y actuar a modo de «trampa evolutiva»: al permitir el movimiento de ciertas especies y fenotipos pero no el de otros, empobrecen la composición de las comunidades piscícolas y las hacen menos resistentes a los cambios, como el calentamiento global u otras presiones de origen antrópico.

En ocasiones, las barreras tienen consecuencias evolutivas más sutiles, según hemos comprobado en varias cuencas fluviales del norte de España. Cuando remontan hasta las cabeceras de los ríos, las hembras de algunas especies anádromas (las que nacen en el río pero crecen en el mar, como algunos salmónidos) se ven obligadas a aparearse con los machos más fuertes y con mayor capacidad natatoria. Ello erosiona la estructuración natural de las poblaciones y las homogeneizaría, porque anula los beneficios adaptativos derivados de la selección sexual y la elección de pareja.

Otra trampa evolutiva causada por las barreras, en este caso por las grandes presas, es su capacidad de alterar el régimen hidrológico. En los ríos de caudal regulado, este suele variar poco, siendo más alto en verano y más bajo en invierno (en el hemisferio norte) de lo que le correspondería a un río natural. Esta homogenización del caudal altera el transporte de los sedimentos, que depende de pulsos estacionales,

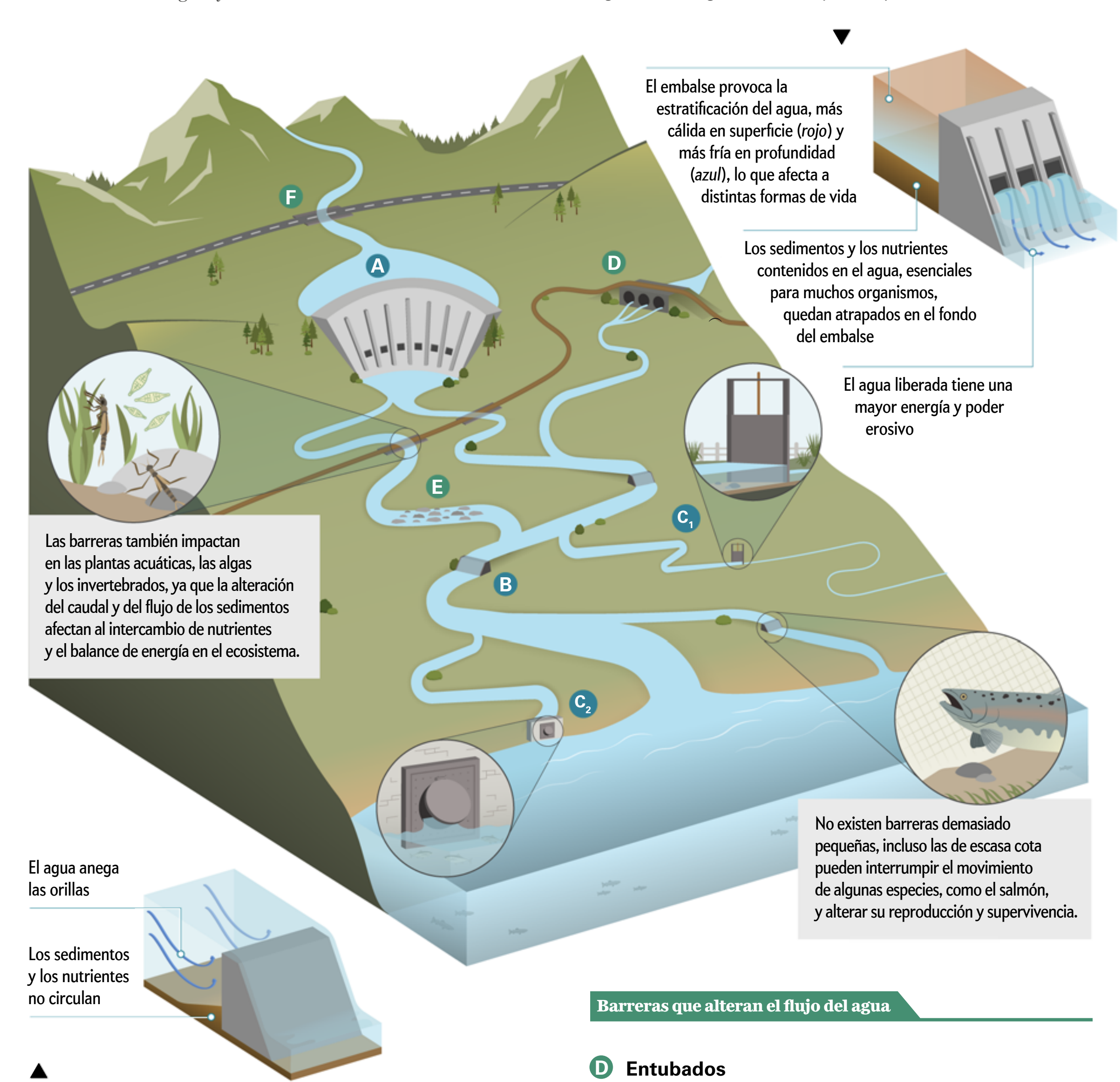
Un río con mil obstáculos

Diversas construcciones humanas alteran el curso de los ríos y los fragmentan, lo que repercute en los organismos y los ecosistemas fluviales. Aquí se ilustran los principales tipos de barreras transversales que existen y sus efectos individuales. Su impacto en el conjunto de la cuenca fluvial es a menudo sinérgico y acumulativo.

Barreras que retienen el agua

A Presas

Almacenan agua, producen energía hidroeléctrica y regulan el caudal. Pero provocan la estratificación térmica del agua y retienen los sedimentos y los nutrientes que transporta el río. Además, la suelta de caudales sin sedimentos tiene un gran poder erosivo, lo que degrada las márgenes fluviales y la compactación del lecho del río.



B Azudes

Desvían parte de la corriente y permiten diversos aprovechamientos hidráulicos, pero anegan el hábitat de las orillas aguas arriba, retienen sedimentos y dificultan el movimiento de los organismos acuáticos.

C Compuertas

Las compuertas fluviales (C_1) controlan el nivel de agua en los canales y esclusas, pero actúan como barreras y anegan el hábitat. Las compuertas de marea (C_2) y otras estructuras costeras protegen los núcleos urbanos de la intrusión salina, pero interrumpen el movimiento de los sedimentos y las especies migradoras, como el salmón y la anguila.

Barreras que alteran el flujo del agua

D Entubados

Permiten salvar pequeños cursos fluviales a personas y vehículos, pero alteran el flujo de agua y resultan infranqueables para muchas especies.

E Rampas de piedras

Utilizadas para corregir el impacto de los ríos canalizados, mitigan el poder erosivo del agua y estabilizan los cauces. Pero interrumpen el flujo de los sedimentos y obstaculizan el movimiento de algunas especies.

F Vados

Permiten el paso de vehículos, pero son una fuente de entrada de materiales finos y, cuando el caudal es bajo, suponen un obstáculo insalvable para algunos peces y otros organismos.

INFOGRAFÍA: MIKEL RODRÍGUEZ HIDALGO

y afecta también a algunas especies migradoras que necesitan caudales altos para ascender el río en determinadas épocas del año. Además, cuando las centrales hidroeléctricas generan mucha energía en los picos de demanda (*hydropeaking*), producen un enorme caudal, lo que puede suceder en cualquier época del año. Ello confunde a algunas especies, que migran en el momento equivocado y, más tarde, cuando la central cesa de turbinar, quedan atrapadas en una parte del río sin suficiente profundidad.

Las barreras afectan no solo a los peces, sino a casi todas las especies del río, incluidos los macroinvertebrados y los hidrófitos (plantas acuáticas), algunos de los cuales necesitan de otras especies para dispersarse. Por ejemplo, algunos hidrófitos dependen de su transporte en el aparato digestivo de los peces para dispersarse y multiplicarse en otros lugares, un fenómeno llamado zoocoria. Y algunos invertebrados muy amenazados, como el mejillón de agua dulce (*Margaritifera margarififera*) o la náyade auriculada (*Margaritifera auricularia*), necesitan completar su ciclo de vida en las agallas de un hospedador piscícola. Si se dificulta o impide el movimiento de los peces, también se altera la dispersión y la supervivencia de otras muchas especies.

A menudo se piensa que la altura de la presa es determinante a la hora de valorar el equilibrio entre sus impactos y beneficios. Una presa grande embalsa más agua, genera más energía hidroeléctrica y proporciona un mayor control sobre las avenidas que un azud más pequeño. Sin embargo, los efectos que ejercen ambas barreras en el movimiento de los organismos pueden no diferir apreciablemente. Por ejemplo, la altura máxima que el salmón atlántico logra franquear es de 3,7 metros (es un valor extremo; normalmente es menor y depende del tamaño del pez, la temperatura del agua y las características del salto). Por lo tanto, un azud de 6 metros de altura produce el mismo efecto que una presa de 120 metros: los salmones no lograrán remontar ninguno de los dos. La subvención de pequeños aprovechamientos hidroeléctricos con la idea de que, a diferencia de las grandes presas, no causarán apenas impactos carece de fundamento. Las minicentrales solo son «mini» en la cantidad de energía que producen, no en las alteraciones que ocasionan. De hecho, construir muchas presas pequeñas provocará con frecuencia una mayor fragmentación fluvial (y generará menos energía) que construir unas pocas presas grandes.

La subvención de pequeños aprovechamientos hidroeléctricos con la idea de que apenas causarán impactos en los ecosistemas carece de fundamento

Según nuestras investigaciones, no existe un umbral de altura por debajo de cual no haya impactos. Estos no dependen tanto de la altura de las barreras como de su número y localización en la cuenca. Los ríos no son destruidos por un fuerte golpe, sino que «mueren por mil cortes».

La fragmentación fluvial en Europa

Hasta hace poco no existía ninguna evaluación global sobre la fragmentación fluvial en Europa, a pesar de que su necesidad viene claramente recogida en la Directiva Marco del Agua de la Unión Europea, la norma comunitaria en política de aguas vigente desde el 2000. El proyecto AMBER nació precisamente para llenar ese vacío de conocimiento. Lo que motivó esta iniciativa fue nuestro convencimiento de que, para solucionar el problema de la fragmentación fluvial en Europa, primero habría que dimensionar la magnitud del problema. No se puede arreglar lo que no se conoce. Financiado por la UE a través del programa Horizonte 2020, el proyecto se desarrolló entre 2016 y 2020 y reunió a más de 60 participantes de 22 instituciones de 11 países europeos, incluidas universidades, centros de investigación, ONG, agencias estatales y también la industria hidroeléctrica.

Con el fin de cuantificar la fragmentación de los ríos, creamos una base de datos unificada de las barreras transversales europeas a

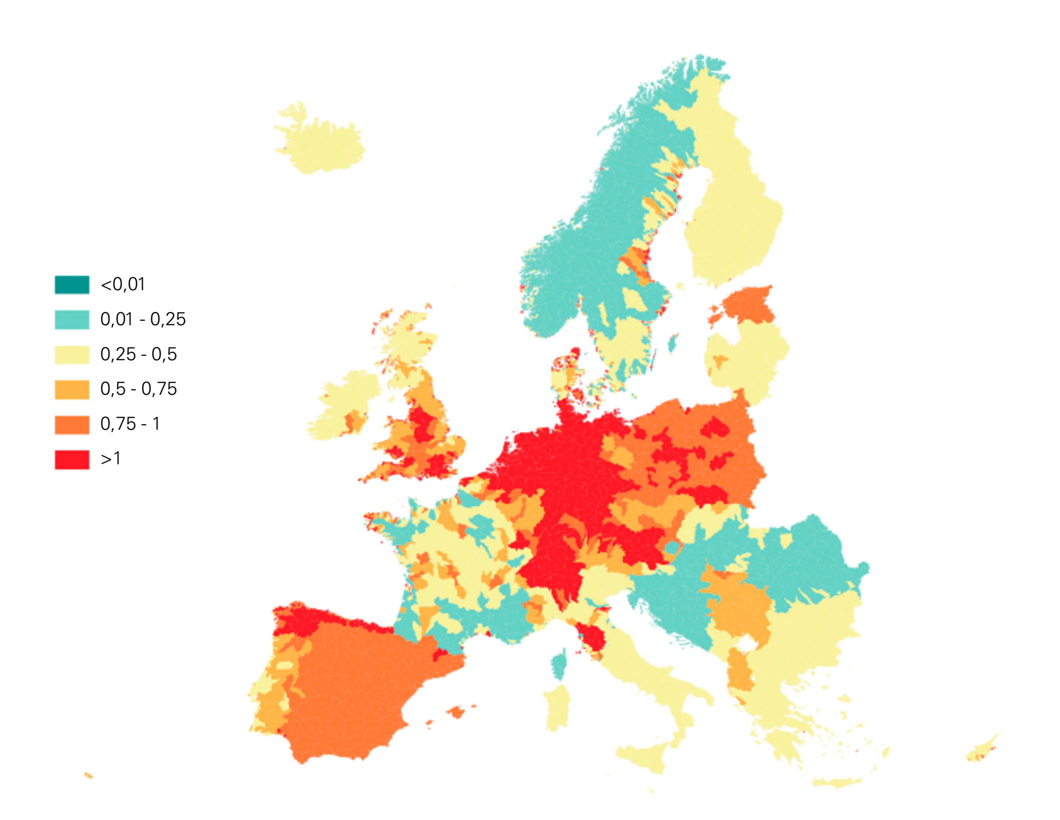
partir de los registros oficiales de 36 países, que comprenden una extensión de 1,6 millones de kilómetros fluviales. Contabilizados un total de 629.955 registros únicos de barreras (después de excluir 106.393 duplicados). Además, recorrimos a pie 2715 kilómetros de 147 ríos para validar las densidades de barreras según los registros con los datos de campo. También utilizamos la técnica de regresión de bosques aleatorios para estimar el número de barreras ausentes y modelizar su ubicación.

Como resultado de los análisis, en junio de 2020 el proyecto lanzó el primer atlas paneuropeo de barreras transversales y la primera evaluación exhaustiva de la fragmentación fluvial basada en densidades de barrera empíricas y modelizadas.

Con una media de 0,74 barreras por kilómetro fluvial, los resultados indican que los ríos europeos son probablemente los más fragmentados del mundo, mucho más que los ríos de Estados Unidos (con 0,04 barreras por kilómetro), China (0,04), Japón (0,02), Brasil (0,008) o la India (0,008). Ello se explica en parte porque el inventario de barreras en Europa es el más exhaustivo, pero también porque nuestros ríos son probablemente los que más tiempo llevan siendo alterados. Existen presas que datan de la época romana y legislación sobre pasos para peces del siglo VII.

La distribución de las barreras de Europa refleja en gran medida la distribución de otras presiones antrópicas. Las mayores densidades tienden a concentrarse en los ríos más alterados e industrializados del centro del continente, mientras que los ríos mejor conectados se encuentran en las áreas de montaña más remotas y menos pobladas, como los Balcanes y Escandinavia. Los resultados de la modelización muestran que es posible predecir la densidad de las barreras a partir de indicadores de uso del terreno (sobre todo la presión agrícola), la densidad de cruces de carreteras, la extensión del agua superficial y la elevación.

Los análisis revelan además que existe una gran disparidad en la abundancia de los distintos tipos de barreras, pero también en la fiabilidad de los datos. De este modo, el número inventariado de presas (61.521) es solo un 16 por ciento inferior al calculado a partir de los



ADAPTADO DE BELLETTI ET AL. EN *NATURE*, VOL. 588, PÁGS. 436-441, 2021/PROYECTO AMBER

EL MAPA DE LA DENSIDAD DE BARRERAS transversales en Europa (número por kilómetro fluvial) demuestra que los ríos más fragmentados se hallan en el centro del continente, y los más conectados, en la zona de los Balcanes y Escandinavia.

El análisis de más de 100.000 barreras fluviales en Europa demuestra que el 91 por ciento de ellas alcanzan menos de cinco metros de altura

datos de campo; en cambio, el número real de rampas, vados y entubados es muchísimo mayor que el que figura en los registros oficiales. De hecho, podrían existir un total de 418.000 rampas (solo en Suiza hay más de 100.000) y quizá 760.000 entubados. En general, al comparar los registros de barreras con los datos de campo, hemos observado que con los primeros se subestima la densidad real en un 61 por ciento, aunque esta cifra varía notablemente entre países (entre el 3 y el 100 por ciento): mientras que algunos, como los Países Bajos, Francia y Suiza, tienen registros bastante exhaustivos, otros, como Albania, Grecia, Rumania o Suecia, tienden a registrar solo las grandes presas y subestiman en gran medida el verdadero alcance de la fragmentación fluvial. Los resultados de España indican que la densidad de barreras según los registros es un 75 por ciento inferior a la estimada con los datos de campo. Ello se debe a la existencia de numerosos registros duplicados, a causa probablemente de la ausencia de un inventario unificado y de las múltiples competencias territoriales en materia hidráulica.

El análisis de más de 100.000 barreras con datos de altura demuestra que el 91 por ciento de ellas alcanzan menos de cinco metros, y el 68 por ciento, menos de dos, siendo la mediana de solo 1,20 metros. En toda Europa, las barreras más subestimadas son las de baja cota, inferiores a un metro, en especial las esclusas, los entubados y los vados. El motivo es que están mal representadas en los inventarios oficiales, que tienden a incluir solo las construcciones más grandes. Además, su pequeño tamaño y su ubicación en las cabeceras hacen que sean más difíciles de localizar. Muchos de los vados y de los entubados son muy recientes y se construyen con nula o escasa consideración sobre su impacto ambiental.

En resumen, si bien en Europa hay casi 630.000 barreras inventariadas, según nuestros cálculos existen en realidad más de 1,2 millones, una cifra que incluso podría alcanzar casi los 3,9 millones. Menos de un 1 por ciento de ellas son grandes presas.

Reconectar los ríos europeos

La nueva Estrategia sobre Biodiversidad para 2030 es un ambicioso plan que tiene como objetivo principal frenar la degradación de los ecosistemas y recuperar la diversidad biológica. En el caso de los ecosistemas fluviales, una meta importante es reconectar al menos 25.000 kilómetros de ríos de flujo libre y sin barreras para 2030. Aunque esta cifra representa menos del 2 por ciento de la red fluvial europea (estimada en unos 1,6 millones de kilómetros de longitud), hemos calculado que, si se actuase estratégicamente en 2500 barreras, podrían reconectarse unos 25.000 kilómetros de ríos, suponiendo que por cada barrera desmantelada se ganaran 10 kilómetros fluviales.

Dicho objetivo implica superar varios retos importantes. En primer lugar, habrá que definir bien el significado de fragmentación fluvial. No existe una medida única para valorarla, ni está claro qué se entiende por «flujo libre», o incluso por «río» en este contexto. ¿Debemos considerar cuencas hidrográficas enteras o basta con incluir segmentos de ríos? ¿Puede afirmarse que un río fluye libremente si discurre sin obstáculos durante cientos de kilómetros, pero luego se ve interrumpido por una única presa cerca del estuario? Se tiende a pensar que el flujo es «libre» únicamente desde la perspectiva de los peces y solo teniendo en cuenta el cauce principal. Tal vez un enfoque más útil podría consistir en definir grados de continuidad (conectividad) a escala de cuenca y determinar unidades fluviales funcionales con una alta calidad ambiental. Este es también el espíritu de la Directiva Marco del Agua. El término «flujo libre» resulta atractivo porque es fácil de imaginar y ayuda a fijar objetivos, pero necesita ser definido de forma rigurosa.

En segundo lugar, habrá que eliminar algunas barreras o introducir nuevos sistemas para captar agua y producir energía. Los inventarios de campo indican que aproximadamente entre un 10 y 15 por ciento de las barreras se hallan fuera de uso y su eliminación debería ser prioritaria. Incluso la industria hidroeléctrica, tradicionalmente recalcitrante a los cambios, lo ve así. A raíz del Congreso Mundial de Energía Hidroeléctrica de 2021, la Asociación Internacional de Energía Hidroeléctrica lanzó la declaración de San José, en la que reconoce que «se debe valorar el posible desmantelamiento de las presas que ya no proporcionan beneficios a la sociedad, presentan problemas de seguridad que no pueden mitigarse de forma rentable o tienen impactos ambientales desproporcionados que no pueden abordarse de manera eficaz». Habrá ocasiones en las que las barreras no podrán eliminarse por el riesgo del avance de especies invasoras o por su valor histórico, económico o social. Pero incluso en tales casos, pueden modificarse y adaptarse para que causen el menor impacto posible y no interrumpan por completo la continuidad fluvial y los procesos naturales. Las barreras pueden dotarse de dispositivos que permitan el paso de los peces y el movimiento de sedimentos, como los desarrollados por el proyecto europeo FIThydro. También es posible emplear nuevos diseños de turbinas sumergidas, como las fabricadas por las empresas Kepler Energy (Reino Unido), Idénergie (Canadá) y Smart Hydro Power (Alemania), que permiten generar energía hidroeléctrica sin tener que erigir presas ni azudes en los ríos. Asimismo, la web Freshwater Information Platform, creada a partir de los resultados del proyecto de investigación europeo MARS (siglas inglesas de «Gestión de Ecosistemas Acuáticos y Recursos Hídricos sometidos a Múltiples Factores de Estrés»), ofrece varias herramientas de gestión para captar agua de manera más eficiente y sostenible.





LA ELIMINACIÓN de las barreras que están fuera de uso es una de las principales herramientas para volver a reconectar los ríos. Aquí se observa el derribo del azud de Trefilerías, en el río Gándara, en Cantabria (*arriba*), y la recuperación del río doce meses después (*abajo*).

C. GARCÍA DE LEÁNIZ

Un tercer reto que deberá abordarse es el diseño de estrategias para reconectar los ríos. Además de aplicar soluciones como las arriba mencionadas, lo primero y más urgente es cesar de fragmentarlos. Hay que recordar que las actividades que más comúnmente provocan la fragmentación no son las presas, sino las obras de ingeniería civil en los cauces (escolleras y rampas de estabilización) y la construcción de caminos, autopistas y carreteras. Cada vez que una carretera, un camino, una pista forestal o una línea de ferrocarril cruza la red fluvial, existe un alto riesgo de fragmentarla. Se necesita una legislación más estricta que aplique el principio de precaución en la planificación y construcción de las vías y que evite —o al menos reduzca— en todo lo posible los cruces con la red fluvial. También es preciso mejorar la formación de los profesionales y los gestores. Los administradores de recursos naturales y las autoridades locales deben ser más conscientes del problema de la fragmentación, así como de la gama de soluciones simples y efectivas que hay disponibles. La idea de que al río hay que «enterrarlo, encauzarlo o desviarlo» para que «no estorbe y no haga daño»

es indefendible, y tiene que ir dejando paso al uso de soluciones basadas en la naturaleza.

Si no se actúa ahora, la fragmentación fluvial probablemente aumentará en el futuro. A ello contribuirá la mayor inseguridad hídrica, exacerbada por el cambio climático, que requerirá construir nuevas presas para hacer frente a la escasez de agua prevista en algunas partes de Europa. Pero también influirá la inseguridad energética, que deberá ser satisfecha mediante energías renovables, además de la hidroeléctrica, también la solar y la eólica, todas las cuales conllevan la construcción de vías de servicio. Asimismo, debe tenerse en cuenta la amenaza creciente de las especies acuáticas invasoras, a las que se intentará frenar mediante la construcción de barreras de exclusión. Además, algunas estructuras antiguas no podrán eliminarse por formar parte del patrimonio cultural e histórico.

Un cuarto reto a la hora de reconectar los ríos consiste en priorizar las intervenciones que son más eficaces y conllevan un menor coste. Deberá seleccionarse las barreras en las que hay que actuar primero para alcanzar el mayor incremento de conectividad con el mínimo esfuerzo posible. Pero para ello se necesitan mejores indicadores de conectividad y métodos modernos de optimización de costes. En la actualidad, apenas se evalúan el 10 por ciento de los proyectos realizados para suprimir las barreras que están en desuso, lo que representa una oportunidad perdida. Puesto que el presupuesto europeo para la restauración de los ríos no es infinito, resulta esencial que la gestión de las barreras siga un proceso claro, transparente y riguroso, y que esté documentado. Las más pequeñas son las más numerosas y también las más fáciles de eliminar y modificar. Los esfuerzos deberían, por tanto, concentrarse en actuar en el mayor número posible de barreras en la cuenca, en lugar de centrase en unas pocas barreras grandes aisladas, aunque estas tengan una mayor repercusión mediática.

Por último, como parte de la nueva Estrategia de Biodiversidad, también deberían valorarse la conveniencia de «reciclar» y modernizar las presas antiguas. Una gran proporción del coste para construir las nuevas se deriva de la adquisición del terreno y la preparación de los accesos. El hormigón es además un material escasamente reciclable con un enorme coste ambiental. En algunos casos resultará más sostenible modernizar y reutilizar las presas abandonadas (que ya han causado fragmentación) que demolerlas y construir unas nuevas en otro lugar. Tiene poco sentido eliminar presas antiguas en el centro de Europa para construir otras en los Balcanes. Del mismo modo, se necesitará reevaluar de forma crítica la construcción de nuevas minicentrales (que aportan muy poco desde el punto de vista energético) frente a la alternativa de mejorar la eficiencia de las presas existentes. En última instancia, son las ganancias y las pérdidas netas de conectividad y energía las que deben tenerse en cuenta.

Finalmente, la participación y la presión ciudadanas son claves en el proceso de reconexión de los ríos. La ciencia ciudadana puede desempeñar un papel muy importante, una cuestión en la que hemos hecho especial hincapié en el proyecto AMBER. Hemos desarrollado la aplicación Barrier Tracker, mediante la que cualquier persona puede contribuir a completar los inventarios de barreras, localizar las barreras que están fuera de uso e identificar las que causan mayores impactos. Al fin y al cabo, unos ríos sanos y que fluyen son necesarios no solo para fomentar la biodiversidad, sino también el bienestar de las personas.

Aunque es posible que Europa tenga los ríos más fragmentados del mundo, también es cierto que cuenta ahora con la información, las herramientas, y el marco legal necesarios para comenzar a desfragmentarlos. Durante las próximas décadas es posible que veamos, por primera vez en la historia, más presas y barreras desmanteladas que de nueva construcción.

Carlos García de Leániz es catedrático de biología acuática en la Universidad de Swansea (Gales), donde dirige el Centro de Investigaciones Acuáticas Sostenibles. Es coordinador del proyecto AMBER, una iniciativa europea para restaurar la conectividad fluvial.



EN NUESTRO ARCHIVO

Ecología de los ríos mediterráneos. Sergi Sabater, Francesc Sabater y Joan Armengol en *IyC*, agosto de 1993.

La presas se desmantelan. Jane C. Marks en *IyC*, mayo de 2007.

Pasos de peces. Consideraciones para un diseño eficaz. Teresa Teijeiro en *IyC*, septiembre de 2007.

La calidad ecológica de los embalses. Enrique Navarro, E. García-Berthou y Joan Armengolen en *IyC*, febrero de 2010.



EL EQUIPO dirigido por la bióloga Katherine Lynch (*en primer plano*) restauró el arroyo Thornton, en la ciudad de Seattle.

JELLE WAGENAAR

INFORME ESPECIAL
ECOLOGÍA FLUVIAL

LA RESTAURACIÓN DE LOS ARROYOS URBANOS

Erica Gies | La reconstrucción de las vías fluviales en las ciudades, como las de Seattle, consigue que arroyos casi muertos vuelvan a estar llenos de vida

El salmón es un alimento tan fundamental para los pueblos indígenas que viven a lo largo de la costa noroeste de Norteamérica que, durante generaciones, diversas naciones se llamaban a sí mismas «El pueblo del salmón». Pero cuando llegaron los colonos, su desarrollo agrícola y urbano devastó las poblaciones de este importante pez. Los nuevos habitantes eliminaron la vegetación que crecía en las orillas de los arroyos y que frenaba y absorbía las lluvias, lo que acabó provocando inundaciones. Enderezaron el trazado de algunos arroyos para favorecer la salida de las aguas de las inundaciones y blindaron los laterales para evitar la erosión, pero la aceleración de la corriente desgarró el lecho de las vías fluviales. Más adelante, los planificadores urbanos y los ingenieros canalizaron los arroyos en tuberías enterradas para poder construir más ciudad encima de ellos y, como consecuencia, las vías fluviales quedaron desconectadas del suelo, de las plantas y de los animales. El impacto acumulado de todas estas heridas provocó inundaciones repentinas, orillas inestables, una fuerte contaminación y una reducción cada vez mayor de la biodiversidad. El sagrado salmón desapareció casi por completo.

Por todo el mundo, las ciudades han modificado a su antojo el curso de las vías fluviales que las atravesaban. Seattle era una de ellas hasta que, en 1999, el Departamento del Interior de los Estados Unidos incluyó al salmón real en su ley de especies amenazadas. Eso obligaba a la ciudad a tener en cuenta su protección cada vez que se aprobara un nuevo proyecto que pudiera afectar a su hábitat. Los ingenieros que intentaban mejorar la salud de los arroyos dañados de Seattle empezaron a reintroducir algunas curvas y a insertar rocas y troncos de árboles para crear un hábitat más natural. Pero, en líneas generales, el salmón no regresó. Las inundaciones continuaron siendo una amenaza porque la lluvia corría desde el duro paisaje urbano hacia los canales, en su mayoría inflexibles, que acababan desbordándose.

En 2004, la bióloga Katherine Lynch asistía a otra nueva reunión sobre cómo resolver estos problemas (en esta ocasión estaba organizada por el departamento para el que trabajaba, los Servicios Públicos de Seattle) cuando tuvo una epifanía. Puede que los proyectos de restauración estuvieran fracasando porque estaban pasando por alto una característica poco conocida y dañada por la urbanización de la ciudad: el «intestino» del arroyo.

En síntesis

En todo el mundo, las ciudades han alterado el curso de los ríos que las atravesaban y han destruido su zona hiporreica, la capa situada justo debajo del lecho fluvial.

Esta capa de sedimento húmedo, piedras pequeñas y organismos diminutos ejerce funciones ecológicas esenciales, frena las avenidas y depura el agua de contaminantes.

La restauración de la zona hiporreica podría convertirse en la mejor estrategia con la que mejorar la biodiversidad y reducir las inundaciones urbanas y la sequía, según se ha demostrado en un arroyo de Seattle.

Una corriente de agua es un sistema. No solo incluye el agua que se desplaza entre sus orillas, sino también la tierra, la vida y el agua de alrededor y bajo ella. Lynch había estado buscando toda la información disponible sobre una capa compuesta por sedimento húmedo, pequeñas piedras y diminutas criaturas situada justo debajo del lecho de la corriente, la llamada zona hiporreica (término que procede de la palabra griega *hypo*, que significa *debajo*, y *rheos*, que significa *corriente*). La corriente de agua va filtrándose en esta capa dinámica y se mezcla con las aguas subterráneas que ascienden por ella. El agua de la zona hiporreica fluye corriente abajo como hace el agua superficial situada por encima de ella, pero mucho más lentamente.

Si el río es grande, la zona hiporreica puede tener más de diez metros de profundidad y hasta casi un kilómetro y medio de ancho por debajo de las orillas. Mantiene sana la corriente de agua regulando los procesos biológicos y químicos esenciales: airea el lecho fluvial, oxigena el agua, mantiene la temperatura dentro de un rango óptimo, elimina la contaminación y permite que prolifere la vida. Algunos biólogos comparan la zona hiporreica con el sistema digestivo humano y su microbioma. Otros dicen que es como el hígado del río.

Una zona hiporreica sana está llena de vida. Crustáceos, gusanos e insectos acuáticos se desplazan constantemente entre esta zona y la corriente superficial. Nematodos, copépodos, rotíferos y tardígrados excavan hacia arriba y ha-

cia abajo, creando espacios en los que el agua se mezcla bajo tierra. Los microbios proliferan en toda esta zona. El agua que brota desde abajo aporta oxígeno a los huevos de salmón depositados en el lecho del río. Lynch se dio cuenta de que, entre todas las personas que trabajan para intentar recuperar las corrientes hídricas de Seattle, muy pocas tenían en cuenta la zona hiporreica o eran conscientes de que la canalización de los arroyos la iba disgregando; o que encerrar el arroyo en tuberías desconectaba la zona de agua de la corriente que pasaba por encima.

La reunión a la que asistía Lynch tenía que ver con el arroyo Thornton de Seattle, el cual, en sus orígenes, atravesaba la rica selva tropical de las tierras bajas, drenando una cuenca de 30,4 kilómetros cuadrados, antes de desembocar en el lago Washington. Los ingenieros lo habían enderezado y blindado con rocas y hormigón, apretujándolo en canales de solo unos pocos metros de ancho en algunos lugares. Su curso de 24 kilómetros corría paralelo a una autopista durante un rato y luego circulaba junto a cientos de patios traseros. Algunas casas estaban tan cerca de la estrecha corriente que sus terrazas sobresalían por encima del agua. El Thornton tenía la reputación de ser el arroyo más degradado de la ciudad. Y no solo eso, también era peligroso: inundaba una carretera principal casi cada año, bloqueando el acceso a colegios, un centro comunitario, hospitales y negocios, y en algunas ocasiones también algunas casas y el instituto de Secundaria situados a su vera.

La reunión se centró en debatir qué era lo mejor que se podía hacer: reconectar la corriente con algunas de sus llanuras aluviales recuperando propiedades adyacentes, o eliminar el blindaje lateral mediante la reintroducción de plantas nativas a lo largo de las riberas. Lynch dijo con claridad que el proyecto debía ir más allá y tenían que reconstruir la zona hiporreica desaparecida. Eso implicaba recuperar el espacio situado debajo del arroyo, llenarlo de arena y gravilla y, con ello, traer de vuelta a los diminutos habitantes de la zona.

Hasta donde Lynch sabía, nadie había intentado reconstruir la zona hiporreica de una corriente urbana. Esperaba que restaurar el «intestino» del arroyo ayudaría a que el Thornton se pudiera mantener por sí mismo, lo que reduciría la necesidad de una asistencia humana continua y costosa. También señaló que, si este enfoque revolucionario tenía éxito, sentaría las bases de una nueva forma de restaurar las corrientes urbanas en una época en la que las inundaciones que se producían en todo el mundo costaban muchas vidas humanas y miles de millones de dólares en daños. Las ciudades de todo el planeta habían confinado y enterrado muchos miles de arroyos y riachuelos, borrándolos de la memoria popular. Un estudio descubrió que en Filadelfia se había enterrado el 73 por ciento de sus arroyos. Según otro estudio similar, en Baltimore, los arroyos enterrados llegaban al 66 por ciento. En todo el mundo había muchos arroyos que, aunque seguían corriendo por la superficie, estaban enfermos o se estaban muriendo. La restauración de la zona hiporreica del arroyo de Thornton podría convertirse en la mejor estrategia con la que mejorar la biodiversidad y reducir las inundaciones urbanas y la sequía.

Los científicos que asistieron a la reunión se mostraron entusiasmados con la propuesta radical de Lynch. Pero en posteriores reuniones se topó con la reticencia de los demás responsables de la toma de decisiones. «La gente no tenía ni idea de lo que les estaba explicando», señala Lynch.

La vida en la zona hiporreica

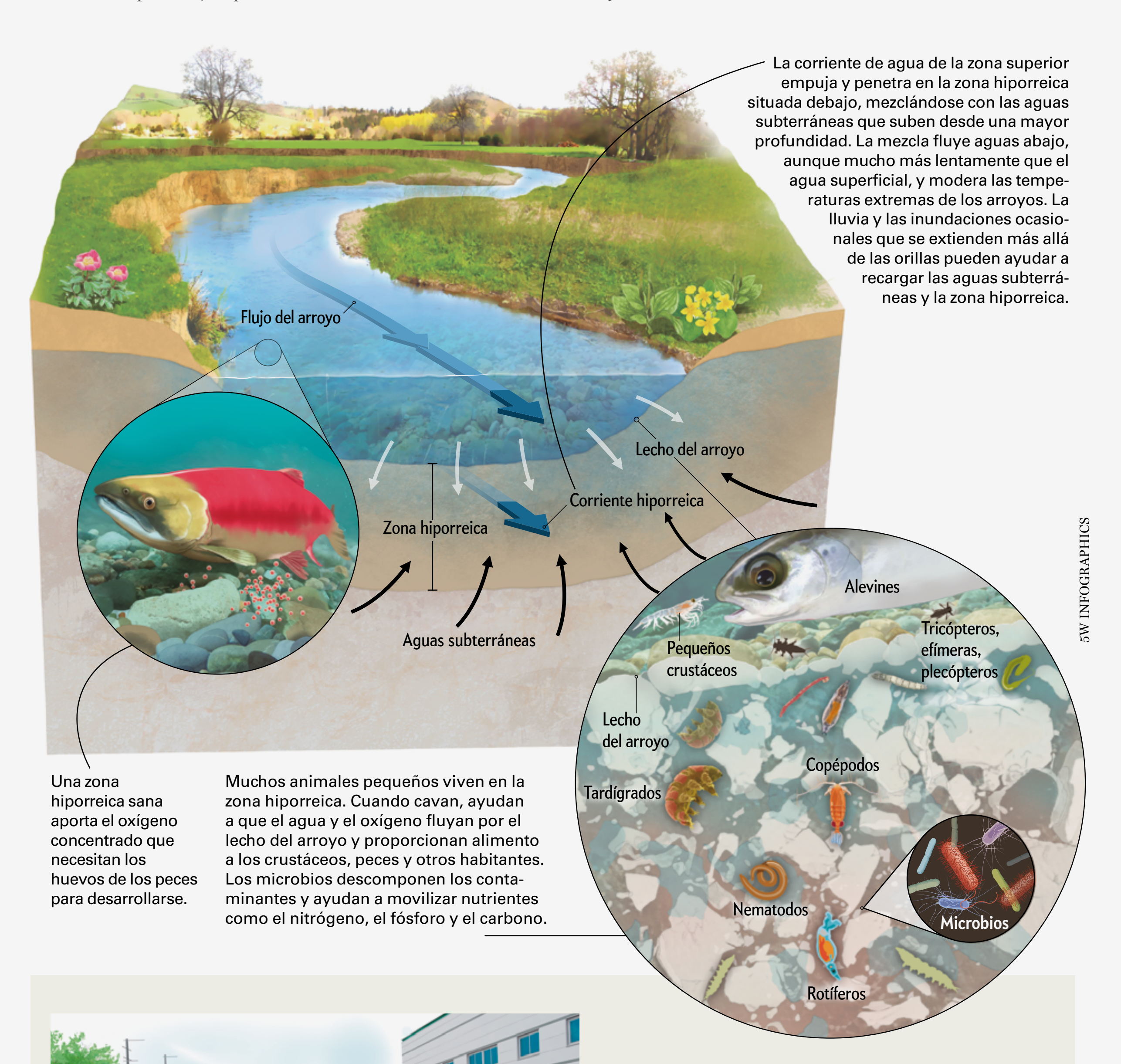
La zona hiporreica es un lugar lleno de vida. Las propiedades químicas de su agua, su temperatura y su biodiversidad son diferentes de las del arroyo que corre por encima de ella y de las de las aguas subterráneas situadas por debajo. Esta clase de ecosistemas de transición, llamados ecotonos, corresponden a espacios intermedios que pueden albergar una gran biodiversidad porque las especies de los ambientes vecinos se mezclan allí, junto con microbios y otros organismos que solo residen en ese lugar.

Los diminutos seres que viven en la zona hiporreica funcionan como ingenieros del ecosistema porque metabolizan los compuestos inorgánicos y los convierten en alimento para las plantas y los insectos. Mueven materia orgánica y nutrientes entre esa zona y los sedimentos del lecho del arroyo y desempeñan un papel fundamental en los ciclos del nitrógeno, el fósforo y el carbono. La zona hiporreica también ayuda a regular la temperatura de la corriente, aportando aguas subterráneas comparativamente más frías durante el caluroso verano y más cálidas durante el frío invierno.

Los científicos también han mostrado lo profunda y ancha que puede ser una zona hiporrei-

El «hígado» del río

La zona hiporreica, poco conocida y apreciada, es una capa acuosa compuesta por piedras y sedimentos, rica en pequeños organismos. Está situada debajo del lecho de un río, riachuelo o arroyo, y se extiende más allá de las orillas. Suministra un curso de agua con nutrientes y limpia los contaminantes, al igual que hace el intestino o el hígado de un ser humano. En las ciudades, el enderezamiento de los arroyos y el endurecimiento de sus orillas paralizan a menudo la zona hiporreica, lo que acaba enfermando o incluso matando al arroyo.



La corriente de agua de la zona superior empuja y penetra en la zona hiporreica situada debajo, mezclándose con las aguas subterráneas que suben desde una mayor profundidad. La mezcla fluye aguas abajo, aunque mucho más lentamente que el agua superficial, y modera las temperaturas extremas de los arroyos. La lluvia y las inundaciones ocasionales que se extienden más allá de las orillas pueden ayudar a recargar las aguas subterráneas y la zona hiporreica.

Una zona hiporreica sana aporta el oxígeno concentrado que necesitan los huevos de los peces para desarrollarse.

Muchos animales pequeños viven en la zona hiporreica. Cuando cavan, ayudan a que el agua y el oxígeno fluyan por el lecho del arroyo y proporcionan alimento a los crustáceos, peces y otros habitantes. Los microbios descomponen los contaminantes y ayudan a movilizar nutrientes como el nitrógeno, el fósforo y el carbono.

5W INFOGRAPHICS

A
B
Zona hiporreica

Síndrome del arroyo urbano

Con mucha frecuencia, las ciudades enderezan los arroyos y endurecen sus orillas, con lo que destruyen la zona hiporreica.

A La lluvia corre sobre el pavimento y los tejados de las casas y, en lugar de penetrar en el suelo, se desliza por las orillas impermeables, desprovistas de vegetación que pueda frenar la corriente. Esta se dirige hacia el lecho, arrastrando contaminantes y llenando el arroyo hasta que se desborda.

B La fuerte escorrentía crea una corriente que se desplaza a gran velocidad, río abajo, y arrastra los sedimentos de la zona hiporreica, los nutrientes, los animales pequeños y los microbios, lo que deja una zona más delgada, desnuda y sin vida.

ca al localizar insectos acuáticos y embriones de peces en el suelo situado más allá de las orillas de la vía fluvial. Para un arroyo urbano como el Thornton, ese alcance lateral puede llegar a los nueve metros contados desde el lecho fluvial. La profundidad puede llegar a ser de un metro por debajo del lecho fluvial.

Enderezar un arroyo y construir sobre su llanura aluvial no solo puede destruir la zona hiporreica, sino también agravar otros problemas: la lluvia que cae sobre el pavimento y los tejados de las casas no puede ser absorbida por el suelo y, en lugar de eso, corre por estas superficies duras, recogiendo la suciedad fina y los contaminantes mientras se dirige hacia el arroyo. Estas corrientes repentinas actúan como una manguera de agua que va raspando el lecho del río y el material hiporreico que hay debajo, depositado durante siglos. Al final, lo que queda es el subsuelo impermeable, compuesto por roca, como pizarra o granito. El lecho fluvial, recto y blindado, a menudo no puede contener la corriente repentina, por lo que el agua se desbordará por las orillas e inundará la zona.

Si las llanuras aluviales están en buen estado, absorben las posibles inundaciones. También ralentizan el agua y reducen su energía y poder erosivo. El agua que corre a menor velocidad puede ser absorbida con más facilidad por el subsuelo y, con el tiempo, una parte regresará al arroyo a través de la zona hiporreica, lo que ofrecerá un suministro de agua en las épocas secas. Los arroyos naturales cuya zona hiporreica es estable poseen una corriente más equilibrada tanto en invierno como en verano, lo cual ayuda a mantener agua en los arroyos durante todo el año, incluso en las regiones propensas a la sequía.

Todos estos procesos permiten que la corriente se mantenga por sí misma. Si eliminamos la zona hiporreica, el intestino biológico del arroyo desaparece y el curso de agua tiene pocas posibilidades de seguir siendo saludable, como cuando los humanos desarrollan problemas graves en el aparato digestivo porque su microbioma intestinal se ha visto afectado.

Reconstrucción de la zona hiporreica

Lynch se enteró de la existencia de la zona hiporreica en el año 2000 mientras estaba en la Universidad de Washington, pero no apreció lo extensa que es esa zona hasta el 2004, durante una excursión a un bosque con Tim Abbe, geomorfólogo y profesor invitado. Se sorprendió cuando hicieron una pausa en el camino y él le comentó que el terreno que pisaban se superponía con la zona hiporreica de un arroyo cercano. Recuerda que observaba los árboles y los helechos y pensaba: ¿cómo es posible?

Si eliminamos la zona hiporreica, el intestino biológico del arroyo desaparece y el curso de agua tiene pocas posibilidades de seguir siendo saludable

Nacida y criada en Nueva Escocia, Lynch se había trasladado al Noroeste del Pacífico y acabó trabajando para el departamento de Servicios Públicos de Seattle, centrándose en la restauración de arroyos y riachuelos. Los dos tramos del arroyo Thornton, cuya revitalización se discutió en la reunión de 2004, fueron bautizados con los nombres de Confluence y Kingfisher. En conjunto, su longitud era de casi 500 metros. El equipo eligió estos tramos porque originalmente eran zonas inundables, y permitir el desbordamiento allí podría reducir en gran medida las problemáticas inundaciones que se producían en todo el recorrido restante del arroyo. El Departamento de Parques de Seattle ya había estado comprando, a los propietarios que lo aceptaron, las casas situadas a lo largo de esos tramos que se habían inundado alguna vez (cinco en Confluence y seis en Kingfisher) para poder recuperar parte del espacio robado al arroyo.

Lynch sabía que conseguir que los responsables de la toma de decisiones aceptaran ensayar una nueva estrategia sería muy difícil. La restauración de los arroyos urbanos tiene un gran precio y hay mucho en juego, en especial garantizar que las propiedades de los ciudadanos no

se inunden. En 2007 y después de muchos debates, en los planes de reforma se contempló la restauración de la zona hiporreica, aunque no fue incluida en el plan de los siete años posteriores. Esa cronología es típica de los proyectos urbanos, señala Lynch, puesto que requieren financiación; coordinación entre los propietarios de las tierras, los grupos comunitarios y diferentes agencias; y evaluaciones de justicia social e igualdad.



JELLE WAGENAAR

AL TRAZAR curvas en el arroyo se ha conseguido ralentizar la velocidad de la corriente cuando recibe el agua de las tormentas. Con ello se protege a los diminutos organismos que viven en la capa hiporreica, situada por debajo del lecho de piedras, que mantienen el agua oxigenada y saludable.

El supervisor de Lynch pidió que el trabajo incluyera un seguimiento del arroyo para que los científicos pudieran proporcionar datos que fueran útiles para los proyectos posteriores. Paul Bakke, por entonces geomorfólogo en el Servicio Federal de Pesca y Vida Silvestre de los Estados Unidos, realizó mediciones de referencia que confirmaron que la zona hiporreica del arroyo Thornton había sido destruida casi por completo. El servicio contrató a Natural Systems Design, una empresa de ciencia e ingeniería que restaura vías fluviales. Lynch, Bakke y Mike Hrachovec, el ingeniero principal de la empresa, se encargaron de crear el innovador diseño.

Para Bakke, la restauración era algo personal, ya que había crecido durante las décadas de 1960 y 1970 junto al arroyo Thornton, pescando truchas y jugando con unos insectos conocidos como patinadores de agua. Poco antes de entrar en el instituto, la ciudad autorizó la construcción de casas a lo largo del borde del arroyo, lo que cortó el acceso a él. «Esos viejos lugares que tanto amaba, mi refugio en la naturaleza [...]no solo se habían vuelto inaccesibles de repente, sino que estaban siendo pavimentados», comenta Bakke. «Fue muy impactante.»

Hrachovec también frecuentaba durante su juventud los arroyos de Black Hills, en Dakota del Sur. Sin embargo, cuando Lynch los juntó para rediseñar el arroyo Thornton, a los dos hombres les costó mucho esfuerzo trabajar juntos. En una de sus disputas, Bakke quería que se colocara grava de mayor tamaño en el lecho del arroyo para que el agua se desplazara con más facilidad hacia la zona hiporreica. Si no, temía que el polvo urbano que llegaba con la escorrentía hasta el arroyo obstruyera el flujo descendente. A Hrachovec, en cambio, le preocupaba que la grava más grande recondujera demasiada agua bajo tierra y que, como consecuencia, en verano la corriente superficial se secara y los peces murieran. Estas incertidumbres son una de las razones por las que es muy difícil que una ciudad intente poner en práctica algo novedoso.

La forma del arroyo, su pendiente, la velocidad del agua y los residuos presentes también influyen en la corriente de entrada y salida de la zona hiporreica. Para resolver las dudas, el equipo emprendió varias pruebas mediante simulaciones por ordenador y experimentos en una gran caja de arena. Modelizaron la dinámica de la corriente jugando con diferentes agregados de roca y añadiendo diversas curvas y maderas en varias posiciones para conducir el agua al subsuelo. Cuando por fin se sintieron satisfechos y cumplieron con los requisitos impuestos por el ayuntamiento, Seattle sacó una convocatoria de licitaciones a principios de 2014. En mayo de 2014, un poco antes de que empezara la construcción, el director del proyecto del departamento de Servicios Públicos de Seattle quiso

modificar el presupuesto porque otro proyecto se estaba quedando sin fondos. «Me preguntó: "¿Qué es eso de la zona hiporreica?"», recuerda Lynch con estupefacción. «Y simplemente eliminó lo destinado a su reconstrucción.»

Lynch le explicó al director lo importante que era la zona y que los elementos hiporreicos representaban tan solo 300.000 dólares del presupuesto conjunto, que ascendía a 10,5 millones de dólares. Le explicó que la inversión —para la excavación y la compra de materiales como cantos rodados, grava y sedimentos más finos— iba a dar sus frutos rápidamente. Su equipo había calculado que reconstruir la zona permitiría ahorrar el millón de dólares que se destinaba al año, en promedio, a dragar sedimentos de un estanque de aguas pluviales construido para absorber la escorrentía pesada.

También le recordó que, gracias al seguimiento continuado, aprenderían lecciones sobre cómo reconstruir arroyos urbanos a pesar de su gran complejidad, lo que convertiría a Seattle en líder mundial en este campo. Al final, aceptaron negociar. Lynch consiguió que el presupuesto de la restauración hiporreica del Confluence se mantuviera intacto; a cambio, el del Kingfisher se reduciría en un 25 por ciento.

En verano de 2014 llegaron las excavadoras. Hrachovec y su equipo trazaron generosas curvas en los espacios ganados a las casas, lo que en algunos puntos hizo aumentar el ancho del arroyo de uno o tres metros a ocho o diez. Para que el lecho recuperase su antigua elevación y poder reintroducir material que sustentara la zona hiporreica, extendieron capas de sedimento y grava a casi dos metros de profundidad. Hrachovec y Bakke insertaron troncos de diferentes tamaños en ángulos concretos, algunos parcialmente enterrados y otros que atravesaban el lecho del río. Se formaron así diminutas cascadas, pequeñas piscinas y bolsas de agua casi quieta que generaban una presión hidráulica que forzaba al agua a penetrar en las capas recientes. Esos troncos y pequeñas rocas colocados meticulosamente, conocidos como «estructuras hiporreicas», también crean remolinos y bolsas de agua lenta que, al emular las características de una corriente natural, proporcionan un refugio seguro para los peces más jóvenes y otros organismos.

La reconstrucción del Kingfisher se acabó el pasado otoño, y la del Confluence en primavera de 2015. La corriente del arroyo se ralentizó y ello favoreció que los sedimentos descendieran en la columna de agua y comenzaran a pulir la forma y el lecho del arroyo. También se consiguió reducir lo que hasta entonces era una rápida acumulación de sedimentos corriente abajo que la ciudad tenía que retirar regularmente, lo que le suponía un gran gasto. Durante los cinco años siguientes, la grava y el limo se fueron acumulando gradualmente detrás de las barreras de madera y, como consecuencia, las pendientes se suavizaron.

El seguimiento permitió a Bakke y Hrachovec rastrear el movimiento de la corriente de agua mediante sensores de temperatura y trazadores. Confirmaron que el agua se estaba introduciendo en la zona hiporreica y circulaba a través de ella. En un artículo publicado en 2020, explicaron que el agua estaba penetrando en ella a un ritmo 89 veces superior a como lo hacía antes de la reconstrucción. Los análisis de los datos demostraron que el arroyo estaba funcionado tal y como preveían Bakke y Hrachovec, y también la naturaleza.

Pero ¿estaba contribuyendo la nueva corriente de agua a que la vida proliferara y a reducir la contaminación?

Repoblando el arroyo

Restablecer el estado natural de un arroyo favorece el regreso de las plantas y los animales desplazados. Sin embargo, en muchos casos solo reaparecen algunas especies. Y debido a que la grava y la arena que el equipo añadió no contenían forma de vida alguna, Bakke pensó que igual necesitaban contribuir activamente a que empezase a prosperar la vida.

Si una especie desaparece de un ecosistema, nuestro instinto nos sugiere que la volvamos a introducir en él. Pero los ecólogos saben por experiencia que reintroducir una especie como la trucha puede suponer la llegada de patógenos con ella. Incluso traer una planta nativa puede alterar el sistema que se ha adaptado a su ausencia.

Kate Macneale, ambientóloga del condado de King, al que pertenece Seattle, lo sabe a la perfección. La experta analiza la población de insectos como medida de salud del arroyo, que valora mediante lo que denomina «puntuación en insectos». Había descubierto una clara correlación entre las aguas de las zonas urbanizadas y las puntuaciones en insectos más bajas, lo que la llevó a pensar que algunas especies eran demasiado sensibles para sobrevivir en ellas.



JELLE WAGENAAR

LOS PEDRUSCOS y los troncos de árboles colocados en el arroyo Thornton, en Seattle, crean remolinos que protegen a peces e insectos. Empujan el agua hacia abajo en la zona hiporreica, donde puede ser limpiada de contaminantes antes de volver a emerger río abajo. Los castores han vuelto a aparecer cerca de un barrio de la ciudad que aparece al fondo.

Pero hace algunos años, una experiencia le hizo repensar esa conclusión. Unos vándalos habían destruido un experimento que había montado en el arroyo Longfellow de Seattle, lo que liberó en el arroyo de la ciudad lo que hasta ese momento eran insectos cautivos. Dos años después, estaba muestreando algunos peces y vio uno de esos insectos, un tricóptero, en el intestino de un pez. Los tricópteros viven tan solo unas semanas, por lo que no podía ser uno de los individuos que se liberaron accidentalmente: debía de ser un «bisnieto de ese individuo», señala Macneale. «No me lo podía creer.»

Se dio cuenta de que la razón por la que en los arroyos reconstruidos faltaban algunos insectos no era su incapacidad para soportar las nuevas condiciones, sino que era porque no había insectos cercanos que pudieran recolonizar el agua. La idea de que la vida regresaría a los arroyos restaurados dependía, en última instancia, de las posibles migraciones de insectos de hábitats sanos situados corriente arriba. Pero en el caso del arroyo Longfellow, señala Macneale, su cabecera «es literalmente el aparcamiento de un gran supermercado». Si los organismos tienen que recolonizar arroyos restaurados, explica, «tenemos que ayudarlos a hacerlo».

Con esa intención, obtuvo permiso del condado de King para repoblar cuatro arroyos con tricópteros, efímeras, plecópteros y otras especies. Algunos lograron sobrevivir. En 2019, el equipo del arroyo Thornton intentó otro movimiento innovador: introducir vida en la zona hiporreica recién restaurada. Si retomamos la comparación con el intestino humano, ese procedimiento fue como administrar probióticos, o incluso realizar un trasplante fecal, a una persona para restaurar su microbioma intestinal.

Aquí es cuando entraron en acción la limnóloga Sarah Morley y la microbióloga Linda Rhodes, ambas de la Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica de EE.UU. Capturaron microbios e invertebrados en pequeñas cestas colocadas en una cuenca de un río cercano mucho más sano, el río Cedar. Se llevaron un par de cestas al laboratorio para ver qué especies habían capturado y enterraron las demás en las zonas hiporreicas restauradas del arroyo Thornton.

Los invertebrados y los microbios colonizaron rápidamente esas zonas. Pero, aunque el número de individuos era alto, la biodiversidad era relativamente baja. Según el artículo escrito por ambas en 2021, publicado en Water, solo lograron proliferar algunas de las nuevas especies, mientras que la mayoría de las restantes eran parecidas a las de los tramos del arroyo sin restaurar.

Morley y Rhodes están intentando averiguar por qué la mayoría de las especies que introdujeron no sobrevivieron. Dado que este campo de conocimiento es muy joven, todavía no han

descartado ninguna posible explicación. Puede que el arroyo donante sea demasiado diferente, o que la zona restaurada sea demasiado pequeña, o la calidad del agua demasiado pobre. Otra posibilidad es que la inoculación en la zona hiporreica se realizara demasiado pronto, antes de que crecieran las pequeñas plantas que necesitan estos insectos para vivir. Y, aun así, Lynch halló en los intestinos de una trucha insectos acuáticos que no se habían visto en el arroyo Thornton desde hacía al menos veinte años. «Los peces saben muestrear mejor que nosotras», bromea Lynch. En la actualidad, los científicos están realizando otro estudio cuyo seguimiento es mucho más exhaustivo.

Sin embargo, Morley y Rhodes descubrieron que los microbios que empezaban a vivir en los tramos restaurados del arroyo eran mucho más activos que los que vivían en los no restaurados cercanos. Ello indicaba, en palabras de la propia Rhodes, que «se estaban preparando para hacer algo», tal vez construir biopelículas y biomasa, limpiar contaminantes o descomponer material orgánico. Los tramos restaurados albergaban siete veces más crustáceos, gusanos e insectos hiporreicos, además de una mayor diversidad de especies.

Rastrear los contaminantes

La cuestión final sobre la restauración del arroyo Thornton era saber si lograba depurar los contaminantes que vierte en él la escorrentía durante las tormentas, desde abonos para el césped hasta residuos urbanos. A Lynch le costó tres años encontrar un químico que quisiera encargarse de esa investigación. «Todos me decían que no podía estudiarse», recuerda. Le explicaban que era demasiado difícil averiguar cuánto tiempo permanecía el agua en la zona hiporreica y medir si los productos químicos se eliminaban mientras el agua se mantenía allí.

Lynch contactó con Skuyler Herzog, ingeniero especializado en la zona hiporreica de la Escuela de Minas de Colorado. «Cogió el primer avión para venir a verme», recuerda Lynch con regocijo. Después de años estudiando la teoría relacionada con la zona hiporreica, estaba entusiasmado de poder realizar pruebas como parte de una restauración real. Lynch también reclutó a Edward Kolodziej, químico de la Universidad de Washington, para que les ayudara.

El equipo introdujo tintes trazadores en una poza diseñada para que empujara el agua hacia

Los tramos restaurados albergaban siete veces más gusanos, crustáceos e insectos hiporreicos, y una mayor biodiversidad

la zona hiporreica. A continuación, controlaron puntos de salida situados a dos y a cinco metros corriente abajo para determinar cuánto tiempo permanecía un «paquete» de agua bajo tierra antes de reincorporarse al flujo superficial; el agua se quedaba entre 30 minutos y tres horas o más. También recogieron muestras de agua del arroyo y utilizaron la espectrometría de masas para cuantificar diversos contaminantes traídos por las escorrentías. En total encontraron unos 1900.

Los científicos también muestrearon «paquetes» de agua antes de que penetraran en los tramos hiporreicos y después de que salieran, y los compararon con el agua que fluía, corriente abajo, por encima de los tramos. En la corriente superficial, alrededor del 17 por ciento de los compuestos químicos redujo su concentración por lo menos a la mitad. En el tramo hiporreico de dos metros lo hizo el 59 por ciento de los compuestos, y en el de cinco metros, el 78 por ciento. Dado que el agua pasa muy poco tiempo en esos tramos hiporreicos, el equipo pensó que la mayoría de los contaminantes se quedaban atascados en los sedimentos o en las biopelículas en lugar de descomponerse inmediatamente por la acción de los microbios, algo muy común cuando se dispone de más tiempo.

A Hrachovec le pareció asombroso que en una zona tan pequeña se pudiera reducir tanto la contaminación. Añade que fue «increíble contemplar cuánto bien podríamos hacer si esto se hiciera con más asiduidad».

¿Un nuevo estándar?

Los hallazgos realizados en el arroyo Thornton son esperanzadores. Los barrios cercanos al

arroyo no se han inundado desde que se acabaron las restauraciones en 2015, ni siquiera durante las tormentas más fuertes. La temperatura y el flujo del arroyo son más constantes durante todo el año. La ciudad necesita dragar con mucha menos frecuencia, se ahorra dinero y a los vecinos les encanta pasar tiempo en los nuevos espacios verdes. Sin embargo, el trabajo realizado también ha puesto de manifiesto lo complejos que son los sistemas naturales y lo difícil que es restaurarlos cuando han sido dañados. Mientras que las ciudades y las agencias gubernamentales buscan cada vez más soluciones basadas en la naturaleza, las lecciones aprendidas en el arroyo Thornton pueden ayudar a los expertos a comprender qué estrategias funcionan y cuáles deben mejorarse.

Este éxito ha permitido a Lynch convencer a los Servicios Públicos de Seattle y a otros gestores urbanos de la vital importancia del intestino de los arroyos. La restauración de la zona hiporreica ha pasado a formar parte de los proyectos públicos relacionados con los arroyos; no siempre se garantiza, pero se tiene en consideración. En la actualidad, hay ocho reconstrucciones planeadas en el arroyo Thornton a lo largo de un tramo de 365 metros. Herzog está ensayando algunas mejoras en el diseño para aumentar la cantidad de tiempo que pasa el agua en la zona hiporreica, y está estudiando en qué medida aumenta ello la depuración. Los planes diseñados para restaurar la rama norte del arroyo Thornton incluyen la incorporación de estructuras hiporreicas. Dado el potencial de la zona para reducir la contaminación, es muy posible que la ciudad incluya estructuras hiporreicas en una restauración programada del arroyo Longfellow, en el que se ha detectado un contaminante procedente de partículas de neumáticos que Kolodziej ha demostrado que es letal para el salmón. La construcción empezará en 2026.

Sin embargo, las restauraciones en tramos pequeños no pueden compensar por completo las heridas causadas en los arroyos de mayor tamaño y en los ríos. «La escorrentía de las aguas pluviales, la biodiversidad, las inundaciones son problemas que afectan a toda la cuenca hidrográfica», señala Bakke. Esa es la razón por la que se han de realizar reconstrucciones en muchas zonas del mismo arroyo o río. Abbe, el geomorfólogo que inspiró a Lynch, trabaja actualmente en Natural Systems Design. Ha planeado y supervisado 14 restauraciones hiporreicas en otros cinco condados del estado de Washington. En 2019, Abbe estaba dando un paseo en una zona de un proyecto del arroyo Poison, en el condado de Chelan, con Steve Kolk, ingeniero de la Oficina de Recuperación de Estados Unidos (una agencia tristemente célebre en los círculos ecológicos por construir gigantescas presas). Cuando Abbe le habló de su trabajo, Kolk se detuvo y dijo: «De lo que estás hablando es de aplicar cientos de miles de estos tratamientos para restaurar nuestra cuenca», a lo que Abbe respondió: «¡Exacto!».

Ampliar el espacio de las corrientes naturales de agua en una ciudad puede parecer una tarea difícil, pero los edificios son reemplazados con más frecuencia de lo que la gente cree, especialmente cuando se inundan con regularidad. Las ciudades pueden reclamar esa tierra, como hizo Seattle. Incluso los proyectos pequeños en lugares clave pueden marcar la diferencia. Gracias a la restauración de las llanuras aluviales del Confluence y del Kingfisher, Seattle ha minimizado las problemáticas inundaciones que se producían a lo largo del arroyo Thornton.

Lo que a Lynch le resulta más excitante es que las actuaciones hiporreicas lograron su éxito más destacado durante el otoño de 2018, cuando el salmón real nadó desde Puget Sound y desovó en las zonas hiporreicas restauradas.

«Fue muy emotivo», recuerda Lynch. «Lo habíamos conseguido. Demostramos que es posible restaurar la zona hiporreica. Es posible restaurar los procesos naturales hasta el punto de atraer a los salmones para que desoven en ese lugar.» Si estas dos pequeñas intervenciones en un arroyo urbano pueden ayudar a que un ecosistema vuelva a funcionar, «creo, realmente, que el futuro es esperanzador», concluye.

Erica Gies escribe sobre ciencia y medioambiente. Sus trabajos aparecen en *Nature*, *bioGraphic* y *New York Times*, entre otras publicaciones. Es autora del libro *Water always wins: Thriving in an age of drought and deluge* (University of Chicago Press, 2022).



EN NUESTRO ARCHIVO

Ecología de los ríos mediterráneos. Sergi Sabater, Francesc Sabater y Joan Armengol en *IyC*, agosto de 1993.
Ciudades esponja. Erica Gies en *IyC*, julio de 2019.
La fragmentación de los ríos. Carlos García de Leániz, *en este mismo número*.



UÑAS DE PIGARGO EUROPEO desenterradas entre los restos de neandertales en el yacimiento croata de Krapina. Las marcas indican que estaban ensartadas en un objeto ornamental, como un collar.

EVOLUCIÓN

NEANDERTALES COMO NOSOTROS

David W. Frayer y Davorka Radovčić | Restos descubiertos en Croacia prueban que los denostados neandertales tenían más en común con los humanos modernos de lo que se suponía

LUKA MJEDA

En marzo de 2021, cuando en Texas y Misisipi se eliminó la obligatoriedad de llevar mascarilla en plena pandemia de coronavirus y en contra del consejo de las autoridades sanitarias, el presidente de Estados Unidos Joe Biden acusó a los gobernadores de ambos estados de «pensar como neandertales». No le faltaba razón en cuanto a lo prematuro de levantar esa medida de precaución contra el contagio, pero se equivocaba al aludir a nuestros parientes en su reprimenda.

Biden no es el único que emplea el término «neandertal» de forma peyorativa. En la cultura popular está arraigada la costumbre de mofarse de los rasgos primitivos, los modos retrógrados y la supuesta estupidez del hombre de Neandertal con calificativos como rupestre, cafre o troglodita. Algunos colegas paleoantropólogos creen que, aun siendo la especie dominante de *Homo* en Eurasia hace entre 350.000 y 30.000 años, era menos humana por carecer de las capacidades cognitivas y conductuales que nos caracterizan.

Pese a ello, numerosos estudios han puesto de relieve las similitudes que nos vinculan con los neandertales. Los hallazgos en yacimientos dispersos por Eurasia evidencian que poseían técnicas innovadoras, complejas estrategias de búsqueda de alimento y tradiciones simbólicas incipientes.

En síntesis

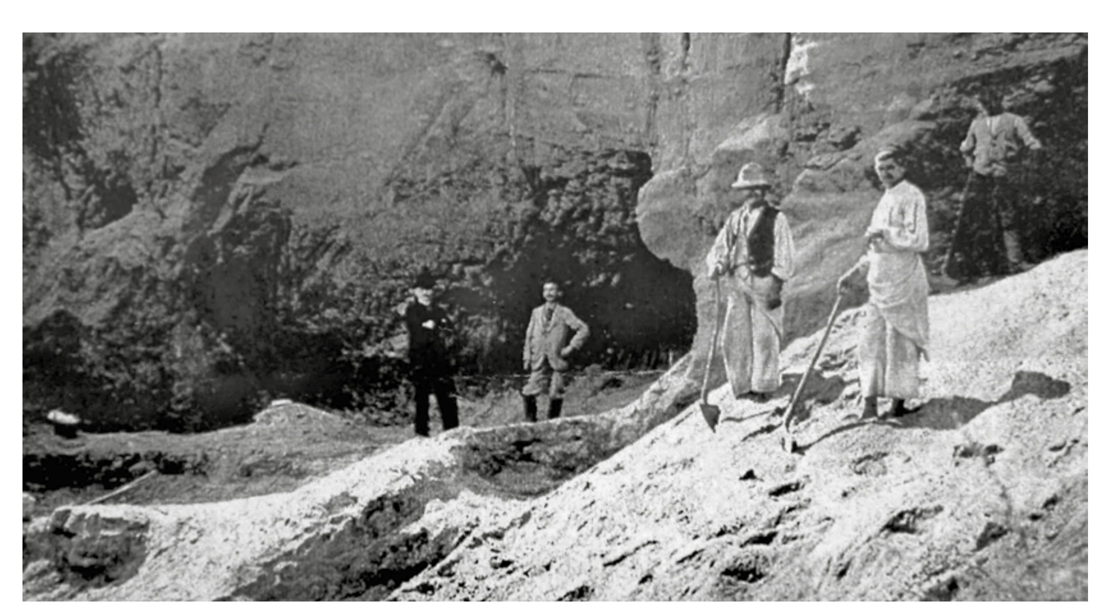
Desde su descubrimiento en el siglo xix, al hombre de Neandertal se le ha considerado primitivo en comparación con *Homo sapiens*.

Los hallazgos en el yacimiento neandertal de Krapina y otros lugares de Europa están modificando esa visión, al aportar claros indicios de pensamiento simbólico, comportamiento ritual y gusto estético.

La lateralización cerebral demostrada a través del dextrismo apunta a la posible posesión de lenguaje por parte de *Homo neanderthalensis*, otro atributo que se creía exclusivo de *H. sapiens*.

No todo el mundo opina lo mismo. Los críticos han argumentado que, lejos de adquirir de forma independiente esos comportamientos avanzados, los neandertales los aprendieron en el curso de sus encuentros con los humanos modernos, de quienes también habrían obtenido artículos elaborados.

Las investigaciones que hemos llevado a cabo en los últimos 15 años acerca de los materiales descubiertos en el yacimiento de Krapina, en el noroeste de Croacia, demuestran que esos críticos están equivocados. Los neandertales que vivieron allí presentaban una serie de conductas que creíamos exclusivas de los humanos modernos y que adquirieron decenas de miles de años antes de que estos llegaran a la región. Queda



EL ABRIGO ROCOSO DE KRAPINA, en el norte de Croacia, estuvo habitado por neandertales hace 130.000 años. Su excavación comenzó a inicios del siglo xx.

MUSEO DE HISTORIA NATURAL DE CROACIA
(todos los objetos se conservan en el museo y se muestran con su permiso)

mucho por descubrir sobre estos enigmáticos miembros de la familia humana, pero hoy tenemos bastante claro que poseían mecanismos cognitivos complejos mucho antes del encuentro con nuestros semejantes prehistóricos.

Los otros

La mala reputación de los neandertales se remonta a mediados del siglo xix, cuando el geólogo británico William King, tras estudiar el cráneo del primer fósil de la especie (hallado en Alemania), escribió: «Los pensamientos y los deseos que una vez habitaron en su interior no rebasaron los de las bestias». Esa percepción se popularizó a comienzos del siglo siguiente, cuando el anatomista francés Marcellin Boule reconstruyó un esqueleto neandertal a partir de los huesos encontrados en el yacimiento de La Chapelle-aux-Saints, en Francia, describiéndolo como un ser encorvado, simiesco, dotado de un cuerpo primitivo y, por fuerza, de una mente de igual condición. Desde entonces, los paleoantropólogos han debatido hasta qué punto se asemejaban a nosotros en la anatomía y la conducta.

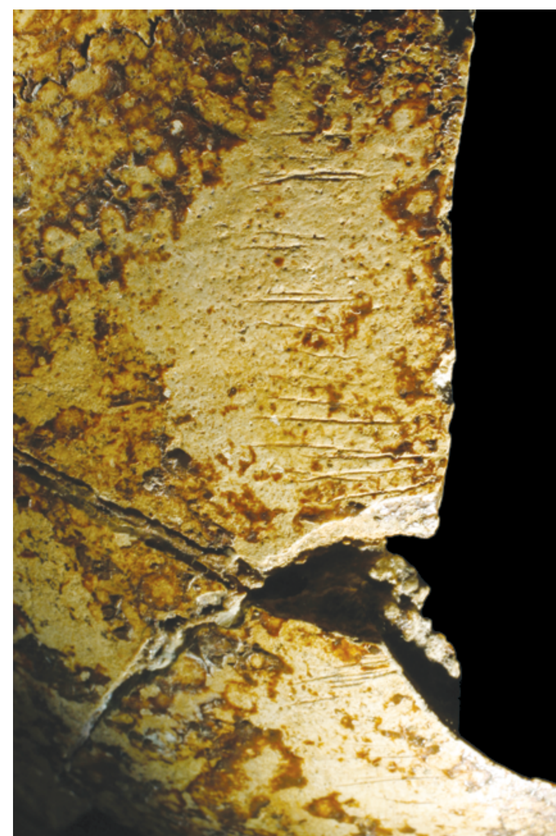
Durante largo tiempo pareció que el comportamiento de los neandertales difería del de los primeros humanos modernos en varios aspectos importantes. Se les atribuyó el uso del mismo conjunto de herramientas durante decenas de miles de años, en tanto que los primeros humanos modernos comenzaban a crear útiles de creciente complejidad, a partir de una gama más amplia de materiales y con una fabricación más elaborada. De forma similar, se creía que la dieta del hombre moderno, compuesta por alimentos de origen animal y vegetal, era mucho más variada que la del neandertal, basada en la caza mayor. La producción de arte y la práctica de rituales también parecían privativos del ser humano moderno.

En los últimos años, empero, los paleoantropólogos han recopilado pruebas que atribuyen a los neandertales modos de comportamiento inconcebibles hace tan solo un par de décadas. Bruce Hardy y sus colaboradores han encontrado haces de fibras retorcidas en el yacimiento francés del Abrigo de Maras, que demuestran el desarrollo de técnicas textiles. En el abrigo rocoso de Pech-de-l'Azé, también en Francia, Marie Soressi y sus colegas han descubierto alisadores, herramientas especializadas fabricadas con hueso y destinadas al trabajo del cuero. João Zilhão y su equipo han mostrado que los neandertales comían mejillones, cangrejos, tiburones y focas, entre otra fauna marina, en la cueva de Figueira Brava, en Portugal, y en otros yacimientos costeros. En más rincones de Europa se han hallado

LUKA MJEDA (*cráneo*); DAVID W. FRAYER (*cortes*)

ESTE CRÁNEO DE NEANDERTAL hallado en Krapina (*izquierda*) muestra una serie de cortes paralelos en la frente que probablemente sean fruto de un comportamiento ritual (*derecha*).





indicios de que comían toda una serie de vegetales, e incluso setas.

No solo hemos descubierto que los neandertales dominaban técnicas que no asociábamos con ellos y que su alimentación era mucho más rica, sino también que poseían ciertos comportamientos de tipo simbólico, como decorar el cuerpo o crear arte. Marco Peresani y su grupo han identificado marcas de corte en las alas de las aves encontradas en la cueva italiana de Fumane, lo que indica que recogían las plumas. Un equipo dirigido por Clive Finlayson observó una imagen abstracta que parecía una almohadilla (#) grabada en el suelo de la cueva de Gorham, en Gibraltar. Y Dirk Leder y sus colegas hallaron un patrón geométrico grabado en la falange de un ciervo gigante en el yacimiento de Einhornhöhle, en Alemania.

Se han desenterrado numerosos ejemplos de la creatividad del hombre de Neandertal, pero con frecuencia han venido acompañados de controversia. La mayor parte de las pruebas de simbolismo datan de la época más tardía de la especie, momento en que los humanos modernos empezaban a extenderse por Europa. Los críticos han aducido que es posible que los neandertales copiaran a los humanos modernos, intercambiasen con ellos esos artículos simbólicos o incluso que se los arrebataran. Tampoco se puede descartar que, en las cuevas habitadas en distintas épocas por ambos grupos, perturbaciones naturales como las corrientes de agua o los animales excavadores removieran y mezclaran los artefactos de unos y otros. Los partidarios de la sofisticación neandertal necesitaban encontrar una prueba de comportamiento complejo que precediera claramente a la llegada del humano moderno a Europa. Y es aquí cuando entra en escena nuestra labor en Krapina.

Comportamiento simbólico

Las primeras excavaciones en el abrigo rocoso de Krapina corrieron a cargo del paleontólogo Dragutin Gorjanović-Kramberger entre 1899 y 1905. Este minucioso investigador cavaba por niveles (retirando de una en una las capas horizontales de sedimentos, huesos y artefactos, algo poco habitual en esa época) y guardó gran parte de lo excavado: cerca de 900 huesos y casi 200 dientes de neandertal, además de miles de huesos de animales y útiles de piedra. En 1906 publicó una completa monografía sobre lo hallado en el lugar. Hoy en día, Krapina sigue siendo uno de los yacimientos más ricos de Europa en material neandertal: desde 1899 se cuentan por miles las publicaciones acerca de sus moradores.

Cada vez más pruebas nos obligan a replantearnos nuestra concepción de estos miembros largamente menospreciados de la familia humana

Nuestras investigaciones recientes han aportado información inesperada sobre los neandertales que vivieron y murieron allí hace 130.000 años. En 2013, uno de nosotros (Radovčić) realizó un inventario completo de todo el material recolectado en el yacimiento y «redescubrió» unos peculiares restos de pigargo europeo (ocho uñas y una falange) cuya importancia había pasado desapercibida. Todos mostraban signos de modificación deliberada y aparecieron en el nivel superior del yacimiento, en la misma capa de sedimentos que albergaba cuantiosos huesos de oso de las cavernas, herramientas neandertales, un cráneo infantil fragmentado y los vestigios de al menos una hoguera. En Krapina no se han descubierto restos de humanos modernos ni de sus útiles, por lo que no hay duda de que los huesos de pigargo fueron traídos por los neandertales.

Las garras de esta rapaz están provistas de una gruesa funda córnea que los neandertales tuvieron que arrancar, dadas las modificaciones que muestran todas las uñas descubiertas en Krapina. Una de ellas presentaba marcas de cortes en la superficie superior y una fibra de tendón bien conservada bajo una capa de silicato, junto a restos microscópicos de ocre rojo y amarillo en los poros. Otras tres garfas y la falange de Krapina también mostraban marcas de cortes. Los bordes de muchas de estas marcas están erosionados, y creemos que puede ser porque ataron las piezas con uno de los tendones. Otras



LUKA MJEDA

UNA LUTITA DESCUBIERTA en Krapina que pudo ser recogida por un neandertal por su atractivo estético.

marcas, como las muescas que lucen algunas de las uñas, hacen pensar que se ensartaron en algún tipo de ornamento, seguramente un collar o una pulsera, o puede que un sonajero.

El conjunto contiene varias uñas del segundo dedo derecho, así que sabemos que las ocho garfas y la falange proceden de al menos tres pigargos. En el Paleolítico, al igual que en los tiempos modernos, las grandes rapaces eran los depredadores aéreos de mayor tamaño. Su escasez dificultaba su caza, por lo que parece improbable que esta fuese una colección casual.

En cambio, los restos indican que los ocupantes de Krapina debían poseer alguna estrategia especializada de caza. En otros yacimientos neandertales han aparecido uñas sueltas que pudieron servir como colgantes, pero en ninguno se han hallado ocho en el mismo nivel arqueológico.

Las garras no son el único indicio del comportamiento simbólico de los neandertales de Krapina. En el mismo lugar se halló una piedra singular, con concreciones en forma de estrella, que no había sido descrita hasta que Radovčić se fijó en ella durante el inventariado de la colección. Está compuesta de lutita datada en el Triásico medio, por lo que no provendría del abrigo de Krapina, formado por arenisca. Todo apunta a que la recogieron en unos afloramientos rocosos cercanos, situados al norte. Mide 92 por 66 milímetros y su grosor máximo es de 17 milímetros, así que cabe perfectamente en la mano. No muestra signos de modificación ni de desgaste por el uso, de ahí que estemos bastante seguros de que no se usó como herramienta.

La piedra es notable por sus numerosas concreciones dendríticas, que son visibles longitudinalmente y en el corte transversal. Las dendritas poseen una apariencia tridimensional y brillan más cuando están mojadas, lo que realza el contraste entre las llamativas ramificaciones negras y el resto de la roca, de color marrón. En la parte inferior de la piedra hay grabadas una serie de formas curvas y largas, dendríticas en su punto medio, que parecen ser la impresión de alguna clase de tallo vegetal fosilizado.

A cualquier coleccionista de rocas le encantaría encontrar un ejemplar como ese. ¿Sintió el mismo asombro el neandertal de Krapina que cogió tan singular roca? En cualquier caso, le interesó lo suficiente como para llevársela a la cueva. La recogida y conservación de esa piedra muestra que los neandertales apreciaban la estética de algunos objetos y les atribuían un significado.

Un cráneo parcial de neandertal encontrado en el yacimiento, conocido como Krapina 3, brinda una prueba de otro tipo de comportamiento simbólico. El espécimen (que parece corresponder a una hembra, por su tamaño y su constitución relativamente frágil) presenta 35 estrías, en su mayoría paralelas, que suben por la frente. No muestran signos de ser heridas curadas, por lo que se deduce que se realizaron tras la muerte. Otros huesos de neandertal desenterrados en Krapina muestran marcas de cortes causadas al

descarnar el hueso, un indicio de canibalismo. Pero los cortes de Krapina 3 están espaciados de manera uniforme y difieren de las típicas marcas entrecruzadas asociadas al despedazamiento que aparecen en esos otros especímenes. Tampoco parecen ser el resultado del pisoteo por parte de animales, pues este habría dejado marcas más dispersas y superpuestas.

Al medir los huesos con un calibrador, este puede dejar marcas, pero las mediciones antropométricas realizadas habitualmente en los cráneos no se refieren a esta parte de la frente. Además, sabemos que las marcas de corte son antiguas porque están rellenas del sedimento de la cueva donde quedó enterrado el hueso y están cubiertas de laca, algo que suelen hacer los paleontólogos para conservar los fósiles. Todo ello apunta a que fueron obra de un neandertal.

En otros yacimientos de neandertales también se han encontrado marcas lineales en huesos, pero pertenecen a extremidades de animales autóctonos. Las marcas del cráneo Krapina 3 son distintas a las de los demás ejemplos de huesos modificados que se han encontrado allí, y suponen un caso único en todo el registro fósil. Lo más seguro es que guarden relación con alguna clase de comportamiento ritual, ya fuera una ceremonia con los restos de un ser amado, un registro numérico o un simple garabateo. Sea cual sea la importancia simbólica de esos cortes, las garras de rapaz o la piedra estrellada, los neandertales ya les atribuían significado hace 130.000 años, 90.000 años antes de que los humanos modernos llegaran a Croacia.

Diestros y zurdos

Otro comportamiento simbólico que, a juicio de muchos expertos, es característico del ser humano moderno y explica nuestro éxito como especie es el lenguaje. ¿Tenían lenguaje los neandertales? ¿Cotilleaban sobre sus vecinos, hablaban de sus esperanzas y miedos, les contaban un cuento a sus hijos antes de dormir? A falta de una máquina del tiempo que nos transporte a su época, no lo podemos saber con certeza, pero existen indicios en los registros arqueológico y fósil. Algunos arqueólogos creen que los ornamentos corporales y otras manifestaciones físicas de simbolismo son indicadores de la existencia de algún tipo de lenguaje. Y los propios fósiles de neandertales también contienen pistas.

Nos propusimos averiguar si se servían preferentemente de una mano en sus quehaceres diarios. El dextrismo es un rasgo muy común: los diestros son mucho más numerosos que los zurdos en cualquier población humana actual. El uso preferente de una mano refleja que los dos hemisferios del cerebro son asimétricos y están especializados en tareas diferentes. Y esta «lateralización cerebral» está asociada a la capacidad lingüística. Otros primates exhiben diversos grados de lateralización, pero solo el ser humano muestra una frecuencia tan alta de dextrismo.

Los neandertales de Krapina ya exhibían comportamientos propios del hombre moderno decenas de miles de años antes de que este llegara a la región

A fin de evaluar el dextrismo de los neandertales de Krapina, usamos microscopía electrónica de barrido y óptica para examinar los rasguños en el esmalte de sus incisivos y caninos. Las estrías, que solo aparecen en el lado de los dientes próximo al labio, se produjeron cuando una herramienta de piedra arañó accidentalmente el esmalte, quizás mientras usaban la dentadura a modo de tercera mano para sujetar un objeto. Cuando un diestro sostiene una herramienta y rasca con ella lo que está agarrando entre los dientes (por ejemplo, un pellejo de animal para descarnarlo), cada vez que se golpee un diente con el instrumento dejará un rasguño en ángulo recto sobre la superficie. En un zurdo, el arañazo presentará el ángulo opuesto. Estudiando los ángulos de las marcas de un único diente, es posible averiguar si su propietario era diestro o zurdo.

Gracias a los análisis de los dientes neandertales de Krapina identificamos nueve diestros y dos zurdos. Al ampliar la muestra a los neandertales de otros yacimientos europeos la proporción de diestros y zurdos es 9:1, la misma que en

los humanos actuales. Resulta interesante apuntar que este pronunciado dominio del dextrismo no apareció por primera vez en los neandertales, sino que se remonta a sus predecesores europeos y a un miembro todavía más antiguo del género *Homo*, procedente de África. Al parecer, la asimetría de los hemisferios cerebrales y, por consiguiente, tal vez el lenguaje, es un rasgo ancestral.

Además del comportamiento, los neandertales comparten muchas más características con los humanos modernos. Estudios minuciosos realizados en Krapina y en otros yacimientos muestran que muchas características morfológicas que se daban por únicas en los neandertales también se han encontrado en los humanos modernos y, de la misma forma, ciertas características de estos últimos también se han hallado en los primeros. Uno de esos rasgos es la forma de una apertura en el lado de la lengua de la mandíbula inferior, llamada foramen mandibular. El nervio mandibular pasa a través de ella para inervar los dientes, las encías y la barbilla. En los humanos modernos, la porción superior del foramen suele tener forma de V. En la mayoría de los neandertales, la apertura está cubierta por un reborde óseo y se denomina foramen horizontal-oval (H-O). Pero, en Krapina, solo cuatro de las nueve mandíbulas de neandertal que conservan esa parte del hueso poseen el típico foramen H-O; en las cinco restantes la forma es en V, la propia del hombre moderno.

Muchas otras características craneales y poscraneales de los neandertales de Krapina también coinciden con las de los primeros humanos modernos. No hay duda de que los neandertales poseían una morfología distintiva, pero numerosos rasgos también están presentes en los humanos modernos que los sucedieron. Es harto improbable que estos últimos desarrollaran de forma independiente dichos rasgos neandertales: lo más seguro es que existiesen grandes variaciones en la morfología neandertal y que en épocas posteriores se produjesen cruzamientos con nuestros antepasados europeos. Los rasgos «únicos» se habrían transmitido en esos episodios de hibridación. Dadas las aparentes similitudes cognitivas entre los neandertales y los primeros humanos modernos, quizá no debería sorprendernos que los dos grupos se reconocieran como humanos e intercambiasen genes en sus encuentros.

A pesar de que en Krapina se dejó de excavar hace más de un siglo, las piedras y los restos óseos siguen dándonos nueva información sobre los neandertales y su lugar en la evolución humana. Seguro que quedan muchos más secretos por descubrir en la colección de Krapina, y nos estamos esforzando por descifrar algunos. Por ejemplo, junto con colaboradores de Inglaterra e Italia, hemos obtenido en un sincrotrón imágenes de alta resolución de dientes infantiles, para evaluar el ritmo de crecimiento a través de la formación del esmalte. Los hombres modernos somos los únicos primates vivos con un período prolongado de crecimiento infantil (el cual permite que nuestros grandes y potentes cerebros se desarrollen), y los investigadores han debatido hasta qué punto ocurría lo mismo con los neandertales. Nuestros resultados muestran que el esmalte de los bebés neandertales se formaba algo más deprisa, lo que denota una mayor velocidad de crecimiento en promedio, pero dentro de los márgenes de los humanos modernos.

Cada vez más pruebas, recabadas en yacimientos de toda Europa, nos están obligando a replantearnos nuestra concepción de estos miembros de la familia humana a los que hemos menospreciado durante mucho tiempo. Y los neandertales de Krapina tienen buena parte de la culpa. Sospechamos que futuros hallazgos en este y otros lugares reducirán aún más la lista de rasgos anatómicos y conductuales que supuestamente nos diferencian de ellos. No eran como nosotros, pero nos unen muchas más cosas que las que nos separan.

Dedicado a la memoria de Jakov Radovčić, conservador de la Colección de Neandertales de Krapina durante 32 años.

David W. Frayer es profesor emérito de antropología biológica en la Universidad de Kansas. Ha estudiado las variaciones esqueléticas y el comportamiento de los neandertales y de otras poblaciones humanas que abarcan más de un millón de años.



Davorka Radovčić es la conservadora de la Colección de Neandertales de Krapina del Museo de Historia Natural de Croacia. Su investigación se centra en los neandertales, en los primeros humanos modernos y en *Homo naledi*.



EN NUESTRO ARCHIVO

La mente neandertal. Kate Wong en *IyC*, mayo de 2015.

Neandertales y humanos modernos en la península ibérica: encuentros y desencuentros. Manuel Vaquero en *IyC*, octubre de 2018.

EL EFECTO FOTOACÚSTICO, O CÓMO ESCUCHAR LA LUZ

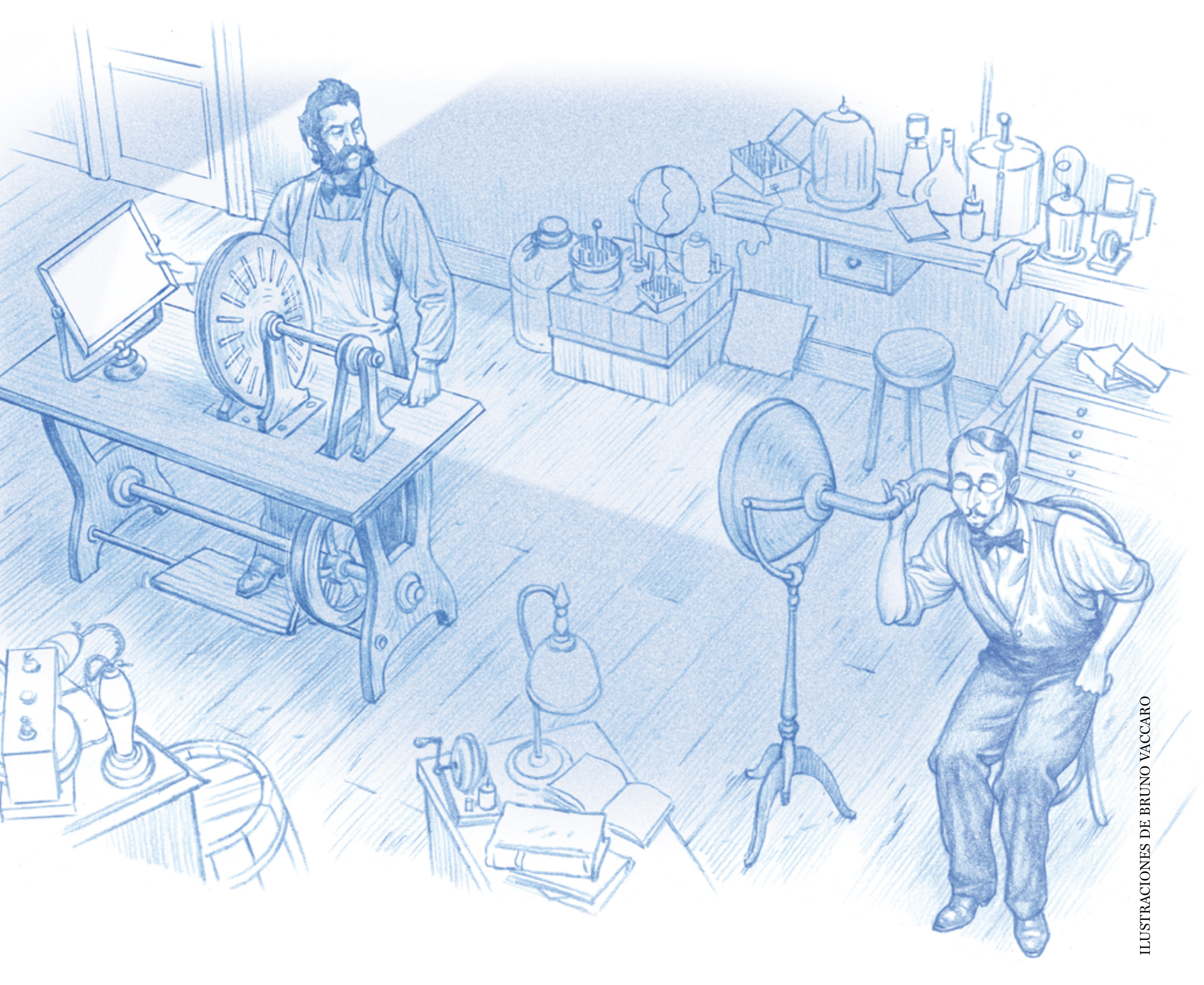
Jean-Michel Courty y Édouard Kierlik | Cuando la luz que ilumina un medio material varía periódicamente, se generan ondas acústicas. Descubierto a fines del siglo XIX, este fenómeno tiene aplicaciones muy modernas

Iluminada por una luz de intensidad modulada, una simple hoja de vidrio recubierta de negro de humo ¡puede emitir un sonido audible! Este efecto lo puso de manifiesto, hacia 1880, el ingeniero de origen escocés Alexander Graham Bell (más famoso por su invención del teléfono): una parte de la energía luminosa absorbida por la muestra iluminada se convierte en energía acústica. Esto se queda en curiosidad de laboratorio. Desde finales de los años 70, con el desarrollo de los micrófonos y las fuentes luminosas ajustables en frecuencia, el efecto ha generado múltiples aplicaciones que van de la detección de trazas de gas a la formación de imágenes clínicas de alta resolución.

Con su «fotófono», Bell buscaba un medio para transmitir voz a través del aire. Empleaba luz solar dirigida, mediante un espejo, hacia su dispositivo experimental. En sus experiencias, la intensidad de esa luz era modulada periódicamente a una frecuencia acústica (del orden de 1000 hertz, por ejemplo) merced a un conjunto de dos discos perforados, uno de los cuales se hacía rotar, mediante un pedal, antes de ser enfocado, por acción de un espejo parabólico, sobre una muestra de material (*véase la primera ilustración*). Cuando los orificios de los discos coincidían, la luz los atravesaba y llegaba a la muestra; cuando no coincidían, el dispositivo se opacaba y la muestra ya no era iluminada. Al añadir al conjunto una suerte de estetoscopio, se oían sonidos.

Sin modulación no hay sonido

Con Charles Sumner Tainter, Bell experimentó y ensayó así numerosas sustancias. Primera observación: muchas emiten un sonido cuyo tono depende de la frecuencia de la modulación luminosa, pero no del material empleado. Sin


ILUSTRACIONES DE BRUNO VACCARO

En este experimento pionero de Graham Bell, se dirige luz solar sobre un par de discos perforados, uno de los cuales se hace girar mediante un mecanismo de pedal. Cuando los orificios de los discos coinciden, la luz pasa e incide en una muestra de material situada en el foco de un espejo parabólico. Con la iluminación intermitente, el material emite un sonido de frecuencia igual a la de modulación de la luz.

modulación no hay sonido. Segunda observación: a igual iluminación, la intensidad sonora es mayor para los materiales coloreados y ennegrecidos. Así pues, en el origen de la emisión del sonido está la absorción de la luz. ¿De qué modo?

Como todos sabemos por experiencia, la luz calienta la superficie de los materiales que la absorben. En el experimento de Bell, en ausencia de luz ya no se cede calor alguno al material, que, por tanto, se enfría. Y vuelve a calentarse en cuanto retorna la luz. Asimismo, cuando la intensidad de la luz varía periódicamente a frecuencias acústicas, lo mismo pasa con la temperatura de la superficie (*véase el recuadro* «El efecto fotoacústico»).

Ciclos de temperatura y de presión

La oscilación de la temperatura de la superficie hace que también oscile la temperatura del aire en contacto con el material, en un espesor que depende del periodo de la modulación. Por tanto, esa capa de aire se dilatará y contraerá al ritmo de las variaciones de su temperatura y desempeñará el mismo papel, para el aire del entorno, que las vibraciones de la membrana de un altavoz. Las variaciones de presión de esa capa de aire generan así una onda acústi-

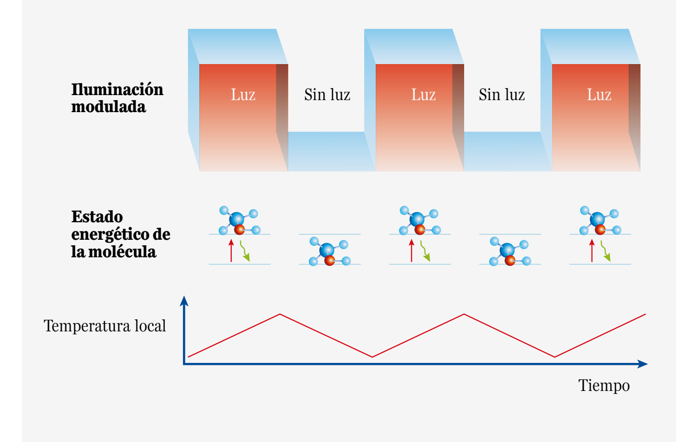
ca detectable por nuestro oído o un micrófono.

Una de las ventajas de la fotoacústica es que la absorción de luz no es privativa de las superficies ennegrecidas, ya que las moléculas pueden absorber fotones individualmente. Una molécula que absorba un fotón se excita a un estado de mayor energía que el estado fundamental. Los estados energéticos accesibles corresponden a un cambio de la configuración electrónica de la molécula, de su estado de vibración o del de rotación. En ausencia de fenómenos de luminiscencia (desexcitación por emisión de un fotón), que es la situación más frecuente, la molécula regresa muy rápido (en un tiempo del orden de una milmillonésima de segundo) a su estado fundamental por disipación en el medio de la energía absorbida, disipación que tiene lugar por choques con las moléculas vecinas.

Dicho de otro modo, en torno a las moléculas que hayan absorbido luz se produce un calentamiento local, se encuentren las mismas en un medio gaseoso, líquido o sólido. En vez de producirse solo en la superficie, el calentamiento en un gas o en un medio transparente afecta al volumen, y es proporcional a la concentración de moléculas que absorben la luz. Y si esta está modulada, el resultado es siempre una emisión de sonido.

El efecto fotoacústico

Supongamos que un material lo iluminamos periódicamente a una frecuencia igual a la de un sonido audible (entre 20 y 20.000 hercios). Durante las fases iluminadas, parte de las moléculas de la superficie del material absorben un fotón y, por ello, pasan a un nivel de energía excitado (*flecha roja*). Esas moléculas se desexcitan enseguida (*flecha verde*) porque, al chocar con sus vecinas, ceden a estas su energía. En consecuencia, la superficie se calienta y sube su temperatura. Durante las fases no iluminadas, la superficie se enfría. Esas variaciones de temperatura se transmiten a la capa de aire en contacto con ella. Por tanto, ese aire se dilatará y contraerá periódicamente, y se producirá una variación periódica de presión que generará una onda sonora de la misma frecuencia que la de iluminación. En las aplicaciones más interesantes del efecto fotoacústico, las variaciones de temperatura (y respectivamente de presión) pueden ser pequeñísimas, del orden del micrognado al miligrado (del nanobar al microbar, en presión), lo que plantea retos técnicos.



Espectroscopía e imagenología fotoacústicas

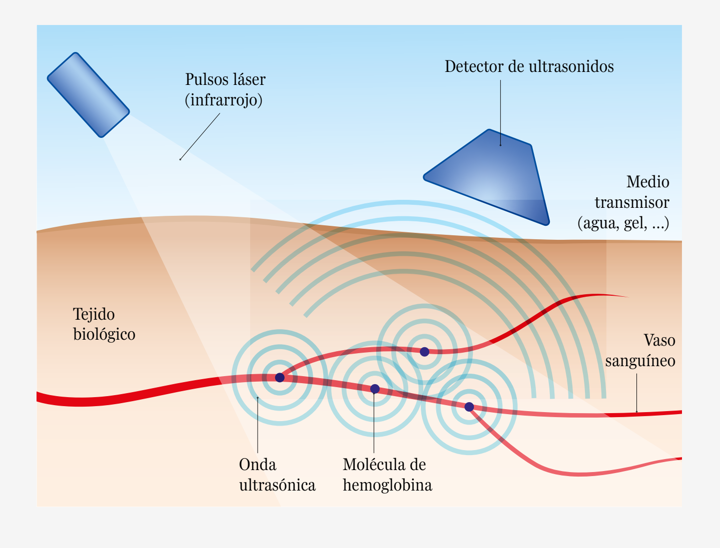
Otra ventaja de este proceso es su selectividad. Como implica una transmisión entre dos niveles moleculares de energía, basta elegir la frecuencia luminosa adecuada para excitar preferentemente ciertas moléculas. Esto resulta especialmente útil para detectar trazas de un gas. Por ejemplo, numerosos contaminantes gaseosos o compuestos orgánicos volátiles absorben ciertas longitudes de onda comprendidas entre 1 y 10 nanómetros (en el infrarrojo). Como la amplitud de la respuesta es proporcional a la concentración del gas rastreado, podemos deducir su valor, con independencia de las condiciones de presión y temperatura, de la presencia de otros compuestos, etcétera.

Los mejores dispositivos permiten así detectar en el aire concentraciones de etileno o de sulfuro de hidrógeno inferiores a una parte por millón. Hoy, al objeto de comprobar mejor la calidad de la ventilación, de un tiempo acá también encontramos detectores fotoacústicos de gas carbónico. Además, con una fuente luminosa ajustable, es posible rastrear varios gases a la vez que hacemos variar la frecuencia luminosa.

Finalmente, podemos invertir el proceso y estudiar el espectro de absorción luminosa de

Imagenología fotoacústica

El efecto fotoacústico tiene aplicaciones en la imagenología clínica. Por ejemplo, si la longitud de onda de la luz la elegimos coincidente con la de excitación de las moléculas de hemoglobina, podremos visualizar los vasos sanguíneos. Una fuente láser emite pulsos luminosos de cierta *frecuencia f*. Al absorber fotones y desexcitarse, las moléculas de hemoglobina (aquí se muestran cuatro) calientan su entorno inmediato durante los lapsos iluminados, y así la alternancia de dilataciones y contracciones genera la emisión de ondas acústicas de *frecuencia f*. Esas ondas, que se propagan sin deformarse por los tejidos blandos, se registran mediante sensores acústicos. Seguidamente, el análisis de las señales permite construir una imagen.



un material mediante el registro de su respuesta acústica. Esto es particularmente adecuado cuando el material es poco absorbente: el sonido que emite es proporcional a la cantidad de energía absorbida. La medida se realiza con respecto a una referencia «sorda» (el equivalente acústico a un fondo negro), independientemente de la energía luminosa restante.

Estas ventajas, y otras más, las encontramos en un ámbito muy distinto: la formación de imágenes clínicas (*véase el recuadro* «Imagenología clínica»). En efecto, numerosas moléculas naturalmente presentes en el cuerpo humano ofrecen una respuesta fotoacústica intensa, lo que puede evitar la inyección de los «agentes de contraste» empleados en otras técnicas de obtención de imágenes. Es este el caso, por ejemplo, de la hemoglobina, que permite obtener, mediante la fotoacústica, buenas «imágenes» de la vascularización sanguínea; ello facilitaría el diagnóstico precoz de ciertos tumores (que se acompañan de la creación de nuevos vasos sanguíneos).

La excelente calidad de esas imágenes revela el hecho de que los tejidos blandos del cuerpo difunden muy poco las ondas acústicas, contrariamente al caso de las ondas luminosas. Gracias a esa transparencia, las ondas acústicas emitidas por las zonas que absorben la luz se propagan en todas las direcciones sin deformarse. Disponiendo una red de sensores que capten esas ondas en diferentes instantes, es posible remontarse al origen de esas ondas y reconstruir seguidamente las imágenes tridimensionales correspondientes: tal es el principio de la tomografía fotoacústica. Una hermosa descendiente del fotófono, invención que Bell tenía como aún más importante que el teléfono.

Jean-Michel Courty y **Édouard Kierlik** son profesores de física en la Universidad de la Sorbona, en París.



PARA SABER MÁS

Applications of photoacoustic sensing techniques. A. C. Tam en *Reviews of Modern Physics*, vol. 58(2), págs. 381-431, 1986.

Imagerie photoacoustique biomédicale. S. Vilov et al. en *Photoniques*, n.º 94, págs. 24-29, 2018.

Détection de gaz par spectroscopie photoacoustique : principe et mise en œuvre. M. Duquesnoy et al. en *Photoniques*, n.º 94, págs. 38-44, 2018.

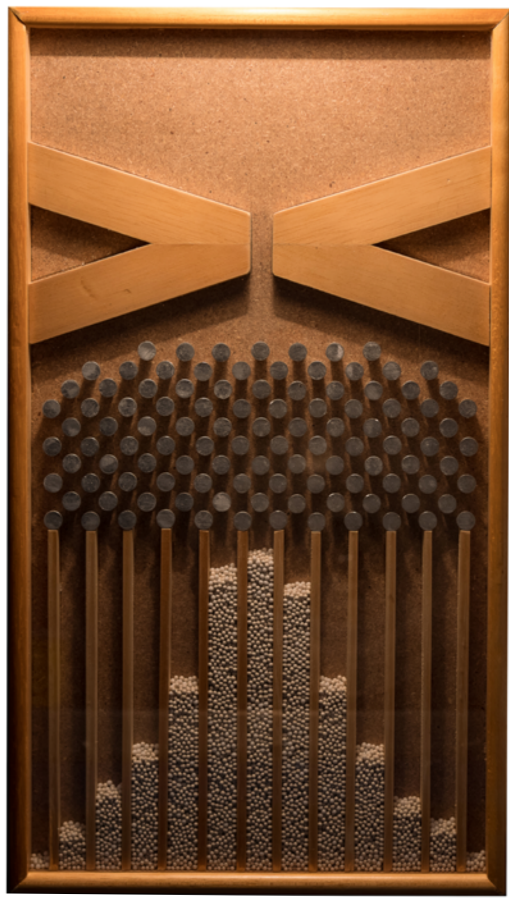
JUEGOS MATEMÁTICOS

¿CÓMO SE DISTRIBUYE EL TALENTO?

Bartolo Luque | La máquina de Galton, el teorema del límite central y la regresión a la media

El científico victoriano sir Francis Galton (1822-1911) fundó la psicometría, desarrolló la identificación mediante huellas dactilares y diseñó el primer mapa meteorológico, por citar algunos de sus múltiples logros. Primo de Charles Darwin, realizó todas sus investigaciones por su cuenta, al margen del ámbito académico, y por ellas acabó recibiendo el título de sir cuando ya contaba 87 años.

En 1869, el polímata inglés concluyó su obra *Hereditary genius* («El genio hereditario»). Se trataba de un estudio estadístico sobre la herencia de algo tan difícil de definir como el talento. Galton buscó patrones en algunas familias eminentes, como por ejemplo los Bernoulli en matemáticas o los Bach en música. Pese a la inevitable arbitrariedad a la hora de asignar talento a cada individuo, Galton concluyó que, en cualquier árbol genealógico, había una marcada tendencia a que este disminuyera con la distancia al personaje más célebre de la familia. Así, los padres e hijos (parientes de primer grado) de Jacob Bernoulli o Johann Sebastian Bach eran menos eminentes que ellos, y sus abuelos y nietos (parientes de segundo grado) lo eran menos aún. Pero ¿por qué el talento parecía disiparse en vez de aumentar? ¿Se debía a algún mecanismo hereditario desconocido?



Tablero de Galton.





1. REPRESENTACIÓN DE LA MÁQUINA DE GALTON original (*izquierda*). Al soltar un gran número de bolas en la parte superior del tablero, estas dan lugar a una distribución normal en los compartimentos inferiores. Galton también diseñó un tablero doble (*derecha*) para comprender la regresión a la media a través de un experimento mental.

El quincunce

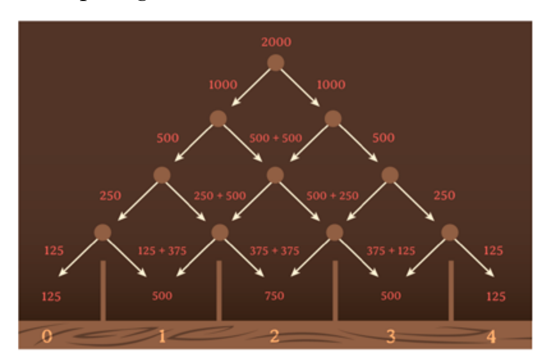
Galton decidió comprobar si sucedía lo mismo con la estatura, una cualidad mucho más fácil de cuantificar que el talento. Los trabajos pioneros en estadística social y antropológica de Adolphe Quetelet ya habían mostrado que muchas variables sociales seguían una distribución normal: una curva simétrica en forma de campana que es ubicua en estadística. Galton encontró que, en efecto, la altura de la población inglesa se distribuía de ese modo, pero necesitaba datos para encontrar la relación entre las alturas de sucesivas generaciones.

En 1873, mientras recababa esos datos y llevaba a cabo una serie de experimentos para determinar el diámetro de los guisantes a lo largo de varias generaciones, Galton diseñó y encargó construir una curiosa máquina: un tablero con un embudo en la parte superior, por el cual se podían soltar perdigones de plomo para que cayeran a través de varias filas de topes desplazadas entre sí y acabaran amontonándose en unos compartimentos verticales situados en el extremo inferior (*véase la figura 1*). ¿Qué pretendía Galton con tan insólito artefacto?

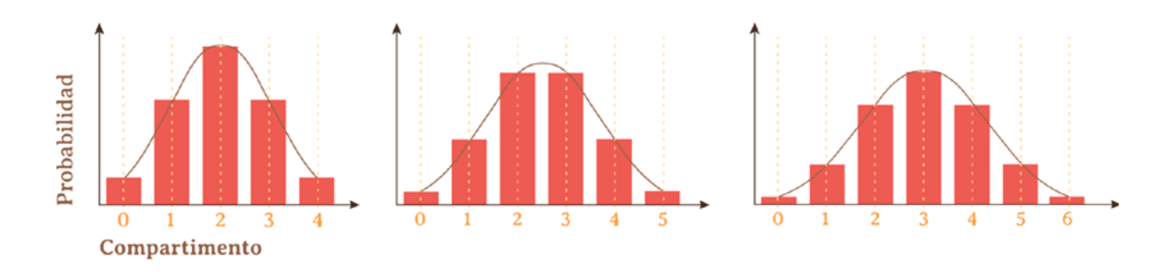
A falta de ordenadores, Galton concibió ese aparato para simular procesos aleatorios. Y lo bautizó como *quincunx* o quincunce, el nombre de una moneda romana que presentaba cinco puntos dispuestos como el 5 de un dado (cuatro en los vértices de un cuadrado y uno en su centro), justo el patrón que exhibían los topes de su máquina. Hoy el quincunce o tablero de Galton es una pieza decimonónica que no falta en ningún museo de la ciencia. Si no ha visto nunca uno en acción, le recomiendo que eche un vistazo a este modelo construido con piezas de LEGO o al propio tablero original, cuyo funcionamiento se desgrana en el excelente vídeo *El tablero de Galton y la distribución normal.*

Las distribuciones binomial y normal

A continuación vemos un esquema de la máquina de Galton, donde suponemos que se lanzan 2000 perdigones:



MIKEL RODRÍGUEZ HIDALGO



2. DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD de los perdigones que se acumulan en los contenedores inferiores para tableros de Galton de 5, 6 y 7 niveles. Para un número grande de perdigones y de filas de topes *n*, la distribución se aproxima a una campana de Gauss, cuya anchura (la desviación típica) depende de *n*.

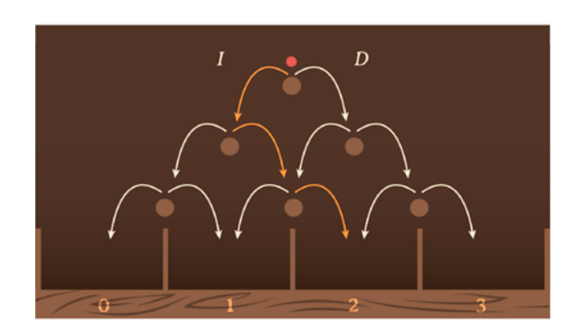
Tras rebotar en el primer tope, cabe esperar que 1000 de los plomos continúen por la izquierda y otros 1000 por la derecha. Y eso mismo ocurrirá en cada tope: en promedio, los perdigones siempre se repartirán en dos mitades, cada una de las cuales pasará por un lado del tope. En los cinco contenedores finales, numerados del 0 al 4, se indica el número esperado de perdigones.

En la figura 2 vemos un histograma que muestra la distribución de probabilidad resultante de nuestro experimento, junto con el ajuste de los datos a una distribución normal. También se incluyen diagramas semejantes para tableros de 6 y 7 niveles.

En un principio, Galton llamó a su dispositivo «instrumento para ilustrar el principio de la ley del error o la dispersión», porque deseaba mostrar de forma mecánica que la suma de una gran cantidad de pequeñas causas accidentales conduce a una distribución de probabilidad estable: la distribución normal. Esta asombrosa ley del azar se conoce como teorema del límite central. El hecho de que la cascada de bolas que rebotan de forma aleatoria a lo largo del tablero siempre acabe produciendo una distribución normal es consecuencia de dicho teorema y resulta tan hipnótico para una mente matemática como el fuego para un pirómano. El propio Galton no escatimaba palabras de admiración:

No se me ocurre nada tan propenso a impresionar la imaginación como la maravillosa forma de orden cósmico expresada por el teorema del límite central. Los griegos, de haberlo conocido, lo habrían divinizado. Reina con serenidad y total humildad en medio de la confusión más salvaje. Cuanto más grande es la multitud y mayor la anarquía aparente, más perfecto es su dominio. Es la ley suprema de la sinrazón: siempre que una muestra grande de elementos caóticos juega un papel similar en magnitud, emerge una forma insospechada y bella de regularidad, presente en estado latente desde el principio.

No resulta difícil calcular la distribución de probabilidad exacta de los perdigones. Observemos el siguiente esquema:

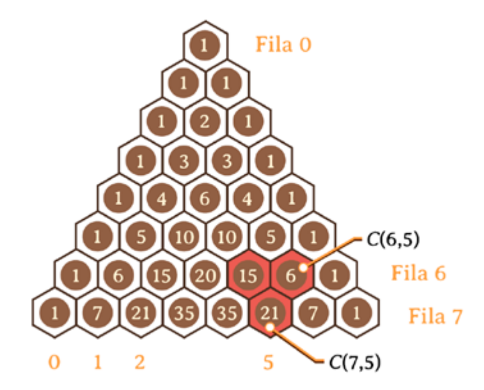


En cada tope, el perdigón (*círculo rojo*) tiene siempre las mismas probabilidades de ir a la izquierda (*I*) o a la derecha (*D*). Solamente hay una manera de que el perdigón acabe en el contenedor 0: debe desviarse tres veces seguidas a la izquierda, algo que podemos representar como *III*. De manera semejante, el único camino que lleva al contenedor 3 es *DDD*. Sin embargo, para alcanzar el contenedor 1 pueden seguirse tres trayectorias distintas: *IID*, *IDI* y *DII*. Y lo mismo ocurre con el contenedor 2, al que se puede acceder a través de los tres recorridos *IDD (en naranja en la figura)*, *DID* y *DDI*. Por consiguiente, tenemos 1, 3, 3 y 1 caminos que conducen a cada uno de los cuatro compartimentos inferiores.

En la siguiente figura hemos representado el esquema de un tablero de Galton de siete filas,

MIKEL RODRÍGUEZ HIDALGO

numeradas del 1 al 7, con el punto de salida del perdigón etiquetado como fila 0:



Cada hexágono representa un tope del tablero de Galton, y el número mostrado en su interior contabiliza el número de caminos que llevan hasta esa posición. En la fila 3, vemos la secuencia 1, 3, 3, 1 que acabamos de discutir en el párrafo anterior. Si numeramos de 0 a n las casillas de la fila n, la cantidad $C(6,4) = 15$ da el número de posibles caminos desde $(0,0)$, el punto desde el que se suelta el perdigón, hasta $(6,4)$. Observemos que para llegar a $(7,5)$ hay que pasar necesariamente por $(6,4)$ o $(6,5)$, de modo que el número de caminos que acaban en esa posición cumplirá

$$C(7,5) = C(6,4) + C(6,5).$$

Y, en general, tendremos que

$$C(n,m) = C(n-1,m-1) + C(n-1,m).$$

A esta igualdad se la conoce como identidad de Pascal y la construcción que acabamos de describir, como el lector seguramente sepa, se llama triángulo de Pascal (o de Tartaglia). En combinatoria enumerativa, los números $C(n,m)$ se denotan como combinaciones de n elementos tomados en grupos de m.

Puesto que la probabilidad de pasar por la derecha o por la izquierda de un tope es siempre 1/2, cualquier trayectoria será igual de probable, de modo que los perdigones se distribuirán en los contenedores de manera proporcional a la cantidad de caminos que conducen a ellos. Para que una trayectoria llegue al compartimento (n,m) ha tenido que desviarse exactamente m veces a la derecha, sin importar cuándo lo haya hecho, y el número de caminos que cumplen esta condición es justamente $C(n,m)$. Así la distribución en un tablero de Galton cuyos contenedores se encuentran en la fila n y están etiquetados como $m = 0, 1, ..., n$ es

$$P(m) = C(n,m)\left(\frac{1}{2}\right)^m\left(\frac{1}{2}\right)^{n-m} = C(n,m)\left(\frac{1}{2}\right)^n.$$

Esta «distribución binomial» determina la probabilidad $P(m)$ de que el perdigón se desvíe m veces a la derecha y $(n - m)$ veces a la izquierda.

De manera más general, si el perdigón tuviera una probabilidad p de desviarse a la derecha en cada tope y $1 - p$ de hacerlo a la izquierda, la distribución binomial sería

$$P(m) = C(n,m)p^m(1 - p)^{n-m},$$

una fórmula que de nuevo consta de dos factores: $C(n,m)$ representa el número de caminos hasta el contenedor m (todas las posibles secuencias de n símbolos con exactamente m letras D y $n - m$ letras I) y $p^m(1 - p)^{n-m}$ es la probabilidad de que se produzca una de esas secuencias.

La distribución binomial aparece cuando nos preguntamos por el número m de veces que ocurre un suceso A (el número de éxitos, en la jerga probabilística) en n intentos independientes de un experimento. Si la probabilidad de éxito en cada intento es p, entonces $1 - p$ es la probabilidad de fracaso, es decir, de que A no ocurra.

Lo que nos muestra el tablero de Galton es, en realidad, un caso particular del teorema del límite central: el teorema de De Moivre-Laplace, que asegura que una distribución binomial con un valor grande de n resulta casi indistinguible de una distribución normal. De este modo, siempre que el tablero de Galton tenga suficientes filas de topes, los perdigones formarán una campana de Gauss en su parte inferior.

La regresión a la media

Galton terminó sus estudios sobre la herencia de la altura en 1877 y los presentó ante la Real Institución de Londres, bajo el título de «ley de desviación del promedio». Había descubierto el mismo efecto que ya había intuido en sus estudios sobre la herencia del genio: la regresión a la media (o a la mediocridad, en palabras del propio Galton), un resultado estadístico que hoy en día sigue siendo fuente de falacias.

¿En qué consiste el fenómeno? El catedrático emérito de la Universidad de Chicago Stephen M. Stigler lo explica mediante un sencillo ejemplo: las notas de un examen tipo test realizado en una clase numerosa, que suelen presentar una

MIKEL RODRÍGUEZ HIDALGO

distribución normal. Si escogemos a un alumno que haya obtenido una nota excepcionalmente alta y lo sometemos a otro examen semejante, ¿sacará mejor o peor nota? La regresión a la media nos da la respuesta: lo más probable es que le vaya peor. Y es que resulta razonable pensar que la buena puntuación del alumno en el primer examen se debió a su buen dominio de la materia (la componente determinista) y algo de suerte (la estocástica). En el segundo examen persistirá la componente determinista, pero cabe esperar que la aleatoria disminuya, dado que habíamos elegido una nota excepcional. En cambio, si hubiéramos tomado una primera puntuación especialmente baja, la situación se invertiría y la regresión a la media jugaría a favor del alumno.

El tablero de Galton ilustra que la suma de muchas desviaciones accidentales produce una curva normal

Pero a Galton le desconcertaba algo. Gracias al quincunce, había demostrado que la acumulación de un gran número de pequeñas desviaciones accidentales generaba una distribución normal. Sin embargo (como en el caso de los exámenes), la altura, el talento o el diámetro de los guisantes presentaban una componente determinista, ligada a la genética. ¿Por qué esas propiedades también se distribuían normalmente? ¿Y cuál era el origen de la regresión a la media?

Galton tuvo que desembarazarse del contexto genético para comprender que la explicación era puramente estadística. Y lo más notable es que lo descubrió con la ayuda de su tablero. Galton diseñó una variante «en dos etapas» (*véase la figura 1*) donde cada bola, tras alcanzar uno de los compartimentos, continuaba su viaje a través de un segundo quincunce dispuesto a continuación. De este modo, cada contenedor del primer tablero generará su propia distribución normal, centrada justo debajo de su posición. Sorprendentemente, al sumar todas esas pequeñas curvas normales (una suma donde tendrán más peso las curvas correspondientes a los contendores centrales del primer quincunce, más cargados de perdigones que los de los extremos) se obtiene de nuevo una distribución normal.

Así, Galton comprobó que, si a una primera curva normal (la obtenida en la primera parte del tablero, que representaría la altura de los padres) le sumamos una componente azarosa (dada por el segundo quincunce), el resultado vuelve a ser una campana de Gauss. Y eso daba cuenta de la distribución normal de alturas en la población.

Y además, con el apoyo visual del quincunce, acabó por desvelar el mecanismo de la regresión a la media: si un hijo presenta una altura extrema (un evento poco probable), es porque a la componente genética que hereda se le ha añadido una gran componente estocástica. En la siguiente generación, cabe esperar que a esa misma componente genética se le sume una estocástica menos extrema (un evento muy probable), por lo que la altura del nieto sufrirá una regresión, un acercamiento a la media. Esta idea llevó a Galton a escribir lo siguiente, en su obra de 1889 *Natural inheritance* («Herencia natural»):

Por paradójico que pueda parecer a primera vista, es un hecho requerido por la teoría, y claramente confirmado por la observación, que la estatura de los hijos adultos debe ser, en conjunto, más mediocre que la estatura de sus progenitores.

Y lo mismo sucedía con el talento: si un personaje había demostrado una especial eminencia, sería gracias a la conjunción de una herencia determinista y una gran dosis de buena suerte en su desarrollo contingente. Así pues, lo más probable es que su descendencia, a pesar de heredar sus buenos genes, no contara con tanta fortuna y atesorara menos talento.

Pero ¿saben lo que me resulta más curioso? Que aparentemente Galton no llegó a fabricar ese segundo tablero doble, sino que solo lo diseñó y calculó los resultados de cabeza, a partir de las simulaciones de su primera máquina. Gracias a este experimento mental y a su habilidad matemática, Galton logró entender el fenómeno de la regresión a la media.

Bartolo Luque es físico y profesor de matemáticas en la Universidad Politécnica de Madrid. Sus investigaciones se centran en la teoría de sistemas complejos.



EN NUESTRO ARCHIVO

Leyes universales. Terence Tao en *IyC*, febrero de 2015.
Las raíces de la inteligencia. Frank Luerweg en *MyC*, n.º 110, 2021.

DIARIO DE UN MEDALLISTA FIELDS

El matemático Cédric Villani evoca el intrincado camino que le llevó a obtener el preciado galardón



Cómo nace un teorema: Una aventura matemática
Cédric Villani
Catarata, 2021
240 páginas

Cédric Patrice Thierry Villani nació en 1973 en Brive-la-Gaillarde, una pequeña localidad del departamento francés de Corrèze. Sus padres eran profesores de literatura, y uno de sus tíos, catedrático de matemáticas. En 1994, tras formarse como matemático en la Escuela Normal Superior de París, comenzó su tesis doctoral, titulada *Contribución al estudio matemático de las ecuaciones de Boltzmann y de Landau en la teoría cinética de los gases y los plasmas*, bajo la dirección del medallista Fields Pierre-Louis Lions. En 2000, con tan solo 27 años, fue nombrado catedrático en la Escuela Normal Superior de Lyon, y al año siguiente recibió el premio Louis Armand de la Academia de Ciencias de Francia.

Su obra *Cómo nace un teorema* está estructurada como un diario con 44 capítulos y un epílogo, que comienza el 23 de marzo de 2008, en Lyon, y acaba el 24 de febrero de 2011, en Budapest. A lo largo de ese periodo, Villani es distinguido con el premio de la Sociedad Matemática Europea, deviene director del Instituto Henri Poincaré de París y recibe los premios Fermat y Henri Poincaré. Esta serie de reconocimientos culmina con la concesión de la medalla Fields en 2010.

Villani ha dado un fundamento matemático a diversas herramientas que los físicos aplican de manera muy provechosa en mecánica estadística. Una de sus áreas de especialización es la teoría del transporte óptimo, acerca de la cual ha publicado dos obras de referencia, *Topics in optimal transportation* (American Mathematical Society, 2003) y *Optimal transport, old and new* (Springer, 2008). Pero la medalla Fields la obtuvo por su trabajo en física matemática, centrado en el comportamiento de las partículas de gases y plasmas.

En el libro, Villani nos habla de su pasión por las ecuaciones de Boltzmann y Vlásov, famosas expresiones en derivadas parciales de la teoría cinética de los gases. La primera de ellas, formulada en 1872 por el físico austríaco Ludwig Boltzmann, describe la forma en que evoluciona la distribución espaciotemporal de las moléculas de un gas, mientras que la ecuación de Vlásov (propuesta en 1938 por el físico ruso Anatoli Vlásov) hace lo propio para un plasma. La diferencia esencial entre ambas expresiones proviene del modo en que interactúan las partículas en cada caso: las moléculas de un gas lo hacen chocando, lo que corresponde a un potencial de muy corto alcance, mientras que la interacción entre las partículas ionizadas de un plasma está dominada por las fuerzas de Coulomb, asociadas a un potencial de largo alcance.

Desde el punto de vista de la física, las predicciones de la ecuación de Vlásov han tenido un enorme éxito, y Villani se puso como objetivo dotar de una base matemática sólida al problema. A pesar de que tenía un profundo conocimiento de la ecuación de Boltzmann, tuvo que superar las dificultades que entraña el salto de los potenciales de corto alcance a los de largo alcance. En particular, para la ecuación de Vlásov no disponemos de una función de Liapúnov que nos proporcione las soluciones en el equilibrio. Sin embargo, el célebre físico ruso Lev Landau, renunciando al rigor matemático, fue capaz de encontrar cierto equilibrio en los plasmas, hoy conocido como «amortiguamiento de Landau».

A pesar de que la obra está repleta de apuntes históricos y descripciones de conceptos y métodos matemáticos, sus páginas no permiten

inferir casi nada de lo que he descrito en el párrafo anterior. Confieso que eso me desorientó al principio, y llegué a pensar que estaba frente a un ejercicio de autopromoción. No entendía los fragmentos de artículos preliminares o los correos electrónicos entre Villani y su antiguo estudiante y colaborador Clément Mouhot, con quien trabajaba en el problema. Hasta que comprendí que el propósito de Villani no era que aprendiéramos matemáticas, sino que experimentásemos la dureza del retorcido laberinto que debe recorrer un investigador en su quehacer matemático. En sus propias palabras, «apreciar un teorema de matemáticas es como mirar un episodio de Colombo: el razonamiento mediante el cual el detective delata al asesino es al menos tan importante como la solución del misterio en sí mismo». Así, debemos ver las páginas abarrotadas de cálculos como documentos gráficos de días de duro trabajo y apreciar los correos electrónicos intercambiados con Mouhot, no por su incomprensible contenido matemático, sino por las emociones que transmiten y que nos permiten palpar los progresos y fracasos de su investigación.

La propuesta de Villani empezó a resultarme interesante y, a partir de ahí, su sinceridad y honradez me arrebataron. Esa franqueza se manifiesta cuando refiere su anhelo por ganar la medalla Fields. La mayoría de los investigadores afirmarían que su única aspiración es el avance del conocimiento, corriendo un tupido velo sobre el mundo de grandes egos y necesidad de reconocimiento en el que compiten. Villani exhibe sin tapujos sus miedos y ambiciones, al tiempo que se muestra humilde cuando describe a sus grandes ídolos matemáticos, como Landau, Andréi Kolmógorov o John Nash (su héroe personal). Como la cosa acaba bien —con la obtención de la medalla Fields «por sus demostraciones del amortiguamiento no lineal de Landau y la convergencia al equilibrio de la ecuación de Boltzmann»—, Villani también consigue transmitir la alegría que sintió desde la notificación personal y secreta del premio hasta la ceremonia de entrega, que tuvo lugar durante el Congreso Internacional de Matemáticos, en la ciudad india de Haiderabad.

Eso sí, les advierto que la energía de Villani parece infinita, y eso hace que uno se sienta muy pequeño al leerlo. Además de lograr su gran objetivo matemático, nos enteramos de que divulga sobre ciencia y arte para todo tipo

Villani no pretende que aprendamos matemáticas, sino que experimentemos la dureza del retorcido laberinto que deben recorrer los investigadores

de público, no solo escribiendo y dando charlas, sino también realizando documentales e interviniendo en los medios de comunicación siempre que tiene ocasión. Es miembro de los comités editoriales de múltiples revistas científicas, vicepresidente del centro de reflexión proeuropeo EuropaNova, presidente de la asociación de investigación sobre la música y la discapacidad Musaïques o asesor científico del Instituto Africano de Ciencias Matemáticas. Y, para rematar, nos deja a las puertas de lo que sería el comienzo de su carrera política.

En una entrevista reciente, Villani hacía la siguiente reflexión: «Las matemáticas son mi trabajo y, por lo tanto, definen mi identidad. [...] La práctica de las matemáticas, en cambio, es una actividad social, una especie de arte —especialmente cuando tenemos que adivinar en qué dirección investigar— y un trabajo colaborativo en el que viajas mucho e intercambias ideas». *Cómo nace un teorema* nos habla de ambas cosas, del monólogo interior de un matemático y de su quehacer social. En la contraportada de la obra, leemos: «Este libro es un trepidante y apasionado relato en el que Villani, con su mezcla de carisma y excentricidad, de precisión y entusiasmo, da cuenta de su hazaña, desde la idea germinal hasta su resolución final». Si quitamos el adjetivo «trepidante», les aseguro que el resto es cierto.

Bartolo Luque
Universidad Politécnica de Madrid